



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“Evaluación del impacto de las emisiones marítimas en la calidad del  
aire del centro de México”**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**PRESENTA:  
GILBERTO MALDONADO PACHECO**

**TUTOR**

**JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO** (Centro de Ciencias de la Atmósfera)

**JURADO EXAMINADOR**

**JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO** (Centro de Ciencias de la Atmósfera)

**ARON JAZCILEVICH DIAMANT** (Centro de Ciencias de la Atmósfera)

**ERNESTO CAETANO NETO**(Instituto de Geografía)

**JORGE ZAVALA HIDALGO** (Centro de Ciencias de la Atmósfera)

**JOSÉ NOEL CARBAJAL PÉREZ** (Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica)

MEXICO DF SEPTIEMBRE 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIA**

*A mis padres por confiar en mí  
y apoyarme siempre.*

*A mis hermanos por siempre creer en mí  
y ayudarme a pesar de las condiciones  
adversas*

*A mis amigos y compañeros por  
que hicieron de este proceso  
una experiencia única*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. José Agustín García Reynoso por apoyarme, confiar en mí y orientarme en todo el proceso de creación de este trabajo de investigación para poderlo concluir satisfactoriamente.

A la Dra. Luisa Molina por permitirme ser parte de este gran proyecto de investigación.

A Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de maestría y terminar el presente trabajo de investigación.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM por permitirme llevar a cabo mis estudios de maestría en esta casa de estudios.

A los amigos y compañeros de trabajo de los cuales aprendí y me divertí mucho durante estos dos años.

A mi familia, por siempre apoyarme y respetar mis decisiones a pesar que no siempre son las mejores.

Sobre todo a Dios, por permitirme vivir y concluir esta experiencia única.

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se analiza el impacto de las emisiones marítimas en la calidad del aire en México utilizando simulaciones numéricas realizadas con el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), y observaciones de GDAS (Global Data Assimilation System) y SEMAR (Secretaría de Marina) para evaluar el desempeño del modelo respecto a las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y las componentes del viento) así como observaciones de la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico) para las variables químicas (ozono y  $PM_{2.5}$ )

Se realizaron simulaciones de las variables meteorológicas y químicas durante cuatro periodos del año. Estos son: 09 – 16 febrero, 15 -22 Mayo, 30 Agosto- 06 Septiembre y 20-27 de Noviembre del año 2011. El dominio seleccionado va desde una latitud de  $8.8^{\circ}$  N a  $35.61^{\circ}$  N respectivamente y con longitudes que van desde  $135.13^{\circ}$  W hasta  $76.25^{\circ}$  W.

Se efectuaron dos simulaciones por cada periodo en donde el *Escenario 1* consiste en realizar la simulación con emisiones marítimas (correspondientes a los buques que navegan cerca de las costas mexicanas) y *Escenario 2*, sin emisiones marítimas. El Escenario 1 toma en cuentas las emisiones por buques o barcos registrados en el inventario de emisiones de la SEMARNAT del año 2008 en el Océano Pacífico y el Golfo de México y que por transporte pueden afectar la calidad del aire del centro del país.

Se usó el conjunto de herramientas METV4.1 (Model Evaluation Tools versión 4.1) para comparar los valores de observaciones y de pronóstico del modelo a nivel estadístico para las variables meteorológicas, mientras que para las variables químicas se usó la aplicación Microsoft Excel.

Se compararon los dos escenarios para cada periodo y se generaron mapas de la diferencia entre ellos para cada variable química, con el fin de observar como variaría la concentración de ozono o material particulado de un escenario a otro. También se realizaron diagramas de caja y bigotes con el objetivo de observar si los datos arrojados por el modelo se encuentran dentro del rango de valores observados. Asimismo se generaron histogramas, diagramas de dispersión y gráficas cuartil-cuartil para cada variable meteorológica y para cada periodo como complemento a la evaluación del desempeño del modelo.

A partir de los resultados, se observa que existen diferencias entre ambos escenarios resaltando el efecto de reducción en la concentración de ozono y  $PM_{2.5}$  que se tiene en general en las zonas costeras de la península de Yucatán, la península de Baja California y las zonas costeras del Pacífico sur (Jalisco, Michoacán, Guerrero, etc.). En cuanto a la Cd. de México, los mayores efectos en términos absolutos se observan en los periodos correspondientes en el mes de mayo y septiembre para  $PM_{2.5}$  con 15.72% y 16.70% respectivamente, mientras que para ozono se observan diferencias menores a 3.7% en los cuatro periodos.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
2.1 General.....	2
2.2 Particulares.....	2
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 TRANSPORTE MARÍTIMO .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2 CONTAMINACIÓN DEL AIRE .....</b>	<b>4</b>
3.2.1 Fuentes de la contaminación del aire .....	4
3.2.1.1 Fuentes naturales .....	5
3.2.1.2 Fuentes antropogénicas .....	5
3.3 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN .....	6
3.3.1 Efectos en la salud .....	6
3.3.2. Efectos en la vegetación .....	6
3.3.3 Efectos en las estructuras y materiales .....	7
3.3.4 Efectos en el tiempo y clima.....	7
<b>3.4 QUÍMICA DEL OZONO .....</b>	<b>8</b>
<b>3.5 PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS.....</b>	<b>10</b>
3.5.1 Clases de partículas atmosféricas.....	10
3.5.2 Tamaño de partícula.....	11
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>12</b>
4.1 ESCENARIO 1.....	13
4.1.1 Obtención de datos y dominio de estudio .....	13
4.1.2 Análisis estadístico .....	15
4.2 ESCENARIO 2.....	18
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
<b>5.1 Evaluación del impacto de emisiones marítimas.....</b>	<b>19</b>
5.1.1 Febrero .....	19
5.1.2 Mayo .....	21
5.1.3 Septiembre.....	23
5.1.4 Noviembre .....	25
<b>6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
<b>6.1 Comparación con mediciones de la RAMA.....</b>	<b>29</b>
<b>6.2 Comparaciones entre los valores de pronóstico del modelo y las observaciones en el área metropolitana para el Escenario 1 .....</b>	<b>30</b>
6.2.1 Febrero .....	31
6.2.2 Mayo .....	32
6.2.3 Septiembre.....	33
6.2.4 Noviembre .....	34
<b>6.3 Comparación de escenarios .....</b>	<b>35</b>

<b>6.4 Comparación con datos de GDAS (Global Data Assimilation System)</b> .....	<b>36</b>
6.4.1 Superficie terrestre.....	36
6.4.2 Superficie marina en el Golfo de México.....	41
6.4.3 Superficie marina en el Océano Pacífico .....	46
<b>6.5 Comparación con mediciones de la SEMAR</b> .....	<b>52</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>57</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>60</b>
<b>9. ANEXOS</b> .....	<b>63</b>
<b>9.1 Características del modelo</b> .....	<b>63</b>
9.1.1 Modelo WRF .....	63
9.1.2 WPS .....	63
9.1.3 WRF-DA .....	63
9.1.4 ARW Solver .....	63
9.1.5 Post-processing and visualization tools.....	63
9.1.6 Proceso de simulación con el modelo .....	64
<b>9.2 WRF-Chem</b> .....	<b>64</b>
<b>9.3 UPP (Unified Post-Processor)</b> .....	<b>65</b>
<b>9.4 Model Evaluation Tools (MET)</b> .....	<b>65</b>
9.4.1 Descripción de herramientas dentro de METV4.1 (Version 4.1) .....	65
<b>9.4.1.1 Point_stat_analysis</b> .....	<b>65</b>
<b>9.4.1.2 Stat_analysis</b> .....	<b>66</b>
<b>9.4.1.3 Rscript</b> .....	<b>66</b>
<b>9.5 NETCDF OPERATORS (NCO)</b> .....	<b>66</b>
<b>9.6 Comparación del modelo con datos GDAS en superficie terrestre</b> .....	<b>67</b>
9.6.1 Mayo .....	67
9.6.2 Septiembre.....	69
9.6.3 Noviembre .....	71
<b>9.7 Comparación del modelo con datos GDAS en superficie marina del Golfo de México</b> .....	<b>73</b>
9.7.1 Mayo .....	73
9.7.2 Septiembre.....	75
9.7.3 Noviembre .....	77
<b>9.8 Comparación del modelo con datos GDAS en superficie marina del Océano Pacífico</b> .....	<b>79</b>
9.8.1 Mayo .....	79
9.8.2 Septiembre.....	81
9.8.3 Noviembre .....	83
<b>9.9 SEMAR (Secretaría de Marina)</b> .....	<b>85</b>
9.9.1 Mayo .....	85
9.9.2 Septiembre.....	87
9.9.3 Noviembre .....	89



9.10 Trayectorias .....	91
9.11 Namelist.wps .....	95
9.12 Namelist.input .....	95
9.13 Marpol_stat_analysis.sh .....	99
9.14 Marpol_point_stat_semar.csh .....	101
9.15 Script en Cshell para la extracción de variables de las salidas del WRF usando NetCDF Operators .....	101
9.16 Programa en C shell para extraer variables usando read_wrf.....	102
9.17 Programa en FORTRAN para modificar las emisiones marítimas .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> Rutas marinas principales del mundo.....	4
<b>Figura 3.2</b> Ejemplo de un diagrama isoplético para el ozono .....	10
<b>Figura 4.1</b> Diagrama detallado del proceso de modelación con el WRF y la evaluación de su desempeño .....	13
<b>Figura 4.2</b> Dominio de modelación seleccionado .....	14
<b>Figura 4.3</b> Ubicación de las estaciones de medición para la base de datos de SEMAR .....	15
<b>Figura 4.4</b> Ubicación de las estaciones de medición para la base de datos GDAS en superficie terrestre .....	15
<b>Figura 4.5</b> Estaciones de medición marítimas para la base de datos GDAS en el Golfo de México .....	16
<b>Figura 4.6</b> Estaciones de medición marítimas para la base de datos GDAS en el Océano Pacífico .....	16
<b>Figura 5.1</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para O <sub>3</sub> en el mes de febrero .....	19
<b>Figura 5.2</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para PM <sub>2.5</sub> en el mes de febrero .....	20
<b>Figura 5.3</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para O <sub>3</sub> en el mes de mayo .....	21
<b>Figura 5.4</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para PM <sub>2.5</sub> en el mes de mayo .....	22
<b>Figura 5.5</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para O <sub>3</sub> en el mes de septiembre .....	23

<b>Figura 5.6</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para $PM_{2.5}$ en el mes de septiembre .....	24
<b>Figura 5.7</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para $O_3$ en el mes de noviembre .....	25
<b>Figura 5.8</b> Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para $PM_{2.5}$ para el mes de noviembre .....	26
<b>Figura 5.9</b> Trayectorias de parcelas de aire durante el periodo correspondiente a septiembre .....	27
<b>Figura 6.1</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de febrero .....	31
<b>Figura 6.2</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de $PM_{2.5}$ de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de febrero .....	31
<b>Figura 6.3</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de mayo .....	32
<b>Figura 6.4</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de $PM_{2.5}$ de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de mayo .....	32
<b>Figura 6.5</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de septiembre .....	33
<b>Figura 6.6</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de $PM_{2.5}$ de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de septiembre .....	33
<b>Figura 6.7</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de noviembre .....	34
<b>Figura 6.8</b> Diagrama de caja y bigote para las observaciones de $PM_{2.5}$ de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de noviembre .....	34
<b>Figura 6.9</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en febrero .....	37
<b>Figura 6.10</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero .....	38
<b>Figura 6.11</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero .....	39
<b>Figura 6.12</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en febrero .....	40

<b>Figura 6.13</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en febrero .....	42
<b>Figura 6.14</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero .....	43
<b>Figura 6.15</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero .....	44
<b>Figura 6.16</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en febrero .....	45
<b>Figura 6.17</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la temperatura en febrero .....	47
<b>Figura 6.18</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero .....	48
<b>Figura 6.19</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero .....	49
<b>Figura 6.20</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la humedad relativa en febrero .....	50
<b>Figura 6.21</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en febrero .....	52
<b>Figura 6.22</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero .....	53
<b>Figura 6.23</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero .....	54
<b>Figura 6.24</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en febrero .....	55
<b>Figura 9.1</b> Esquema simplificado de las etapas de modelación del WRF .....	63
<b>Figura 9.2</b> Esquema simplificado de las etapas de MET .....	67
<b>Figura 9.3</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en mayo .....	69
<b>Figura 9.4</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo .....	69
<b>Figura 9.5</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo .....	70
<b>Figura 9.6</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en mayo .....	70

<b>Figura 9.7</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en septiembre .....	71
<b>Figura 9.8</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre .....	71
<b>Figura 9.9</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre .....	72
<b>Figura 9.10</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en septiembre .....	72
<b>Figura 9.11</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en noviembre .....	73
<b>Figura 9.12</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en noviembre .....	73
<b>Figura 9.13</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre .....	74
<b>Figura 9.14</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en noviembre .....	74
<b>Figura 9.15</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en el mes de mayo .....	75
<b>Figura 9.16</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en el mes de mayo .....	75
<b>Figura 9.17</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en el mes de mayo .....	76
<b>Figura 9.18</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en el mes de mayo .....	76
<b>Figura 9.19</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en el mes de septiembre .....	77
<b>Figura 9.20</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en el mes de septiembre .....	77
<b>Figura 9.21</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en el mes de septiembre .....	78
<b>Figura 9.22</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en el mes de septiembre .....	78
<b>Figura 9.23</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en el mes de noviembre .....	79

<b>Figura 9.24</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en el mes de noviembre .....	79
<b>Figura 9.25</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en el mes de noviembre .	80
<b>Figura 9.26</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en el mes de noviembre .....	80
<b>Figura 9.27</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la temperatura en mayo .....	81
<b>Figura 9.28</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo .....	81
<b>Figura 9.29</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo .....	82
<b>Figura 9.30</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la humedad relativa en mayo .....	82
<b>Figura 9.31</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la temperatura en septiembre .....	83
<b>Figura 9.32</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre .....	83
<b>Figura 9.33</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre .....	84
<b>Figura 9.34</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la humedad relativa en septiembre .....	84
<b>Figura 9.35</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la temperatura en noviembre .....	85
<b>Figura 9.36</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la componente zonal del viento en noviembre .....	85
<b>Figura 9.37</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre .....	86
<b>Figura 9.38</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico los pronósticos para la humedad relativa en noviembre .....	86
<b>Figura 9.39</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en mayo .....	87
<b>Figura 9.40</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en mayo .....	87

<b>Figura 9.41</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo .....	88
<b>Figura 9.42</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo .....	88
<b>Figura 9.43</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en septiembre .....	89
<b>Figura 9.44</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre .....	89
<b>Figura 9.45</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre .....	90
<b>Figura 9.46</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en septiembre .....	90
<b>Figura 9.47</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en noviembre .....	91
<b>Figura 9.48</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en noviembre .....	91
<b>Figura 9.49</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre .....	92
<b>Figura 9.50</b> Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en noviembre .....	92
<b>Figura 9.51</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de febrero para el caso de ozono .....	93
<b>Figura 9.52</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de mayo para el caso de ozono .....	93
<b>Figura 9.53</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de septiembre para el caso de ozono .....	94
<b>Figura 9.54</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de noviembre para el caso de ozono .....	94
<b>Figura 9.55</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de febrero para el caso de PM <sub>2.5</sub> .....	95
<b>Figura 9.56</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de mayo para el caso de PM <sub>2.5</sub> .....	95
<b>Figura 9.57</b> Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de septiembre para el caso de PM <sub>2.5</sub> .....	96

**Figura 9.58** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de noviembre para el caso de  $PM_{2.5}$  ..... 96

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Categorías de uso de suelo del WRF .....	18
<b>Tabla 6.1</b> Descripción de variables estadísticas .....	28
<b>Tabla 6.2</b> Interpretación de las variables estadísticas .....	28
<b>Tabla 6.3</b> Estadísticos para la base de datos de la RAMA .....	29
<b>Tabla 6.4</b> Diferencia en porcentaje entre escenarios (Escenario 1 – Escenario 2) .....	30
<b>Tabla 6.5</b> Estadísticos para la base de datos GDAS en superficie terrestre .....	37
<b>Tabla 6.6</b> Estadísticos para la base de datos GDAS en el Golfo de México .....	41
<b>Tabla 6.7</b> Estadísticos para la base de datos GDAS en la superficie marina del Océano Pacífico .....	46
<b>Tabla 6.8</b> Estadísticos para la base de datos SEMAR.....	51

# 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es un problema que preocupa principalmente en las grandes ciudades debido a los impactos que ésta tiene en la salud de los seres humanos, la vegetación y las construcciones. Es por ello que se han llevado a cabo acciones para disminuir las emisiones de contaminantes en las grandes urbes del país, en particular los compuestos relacionados con ozono y partículas, por ejemplo, se han implementado programas como el “Hoy no Circula” y la verificación vehicular en la Cd. de México. Estas acciones han dado resultados disminuyendo la concentración de estos contaminantes, sin embargo, se siguen teniendo episodios donde se rebasan los límites de las normas mexicanas, por lo que es fundamental encontrar las causas que los puedan originar en una zona tan poblada como la capital del país.

Se ha encontrado que una de las causas es la compleja orografía que rodea a la Ciudad de México lo que provoca que la ciudad no se ventile bajo ciertas condiciones meteorológicas (Lei et al., 2008). Asimismo, el transporte regional desde la ciudad de Toluca, Edo. de México (García et al., 2009) o Tula, Hidalgo (García et al., 2014) puede afectar la calidad del aire en la capital del país por lo que se entiende que el problema no es local sino que abarca toda la zona metropolitana o incluso desde lugares más lejanos debido a fenómenos como los incendios.

Partiendo de ello, se estableció la hipótesis de que las emisiones de buques que navegan cerca de las costas mexicanas afectan la calidad del aire en el interior del país y que una reducción en estas emisiones ayudaría a disminuir los niveles de ozono y  $PM_{2.5}$  en las zonas costeras o incluso que tendría algún impacto en el centro del país. A partir de esto se decidió usar el modelo numérico WRF para simular un escenario con emisiones marítimas y otro sin ellas y evaluar el desempeño del mismo con datos de observaciones de GDAS (Global Data Assimilation System), SEMAR (Secretaría de Marina) y RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico).



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General**

- Evaluar el impacto de las emisiones marítimas en la calidad del aire en el centro de México.

### **2.2 Particulares**

- Modelar la calidad del aire con un escenario base (emisiones terrestres y marítimas) y con un escenario sin emisiones marítimas.
- Evaluar la diferencia entre el escenario con emisiones marítimas y el escenario sin emisiones marítimas
- Evaluar el desempeño del modelo.

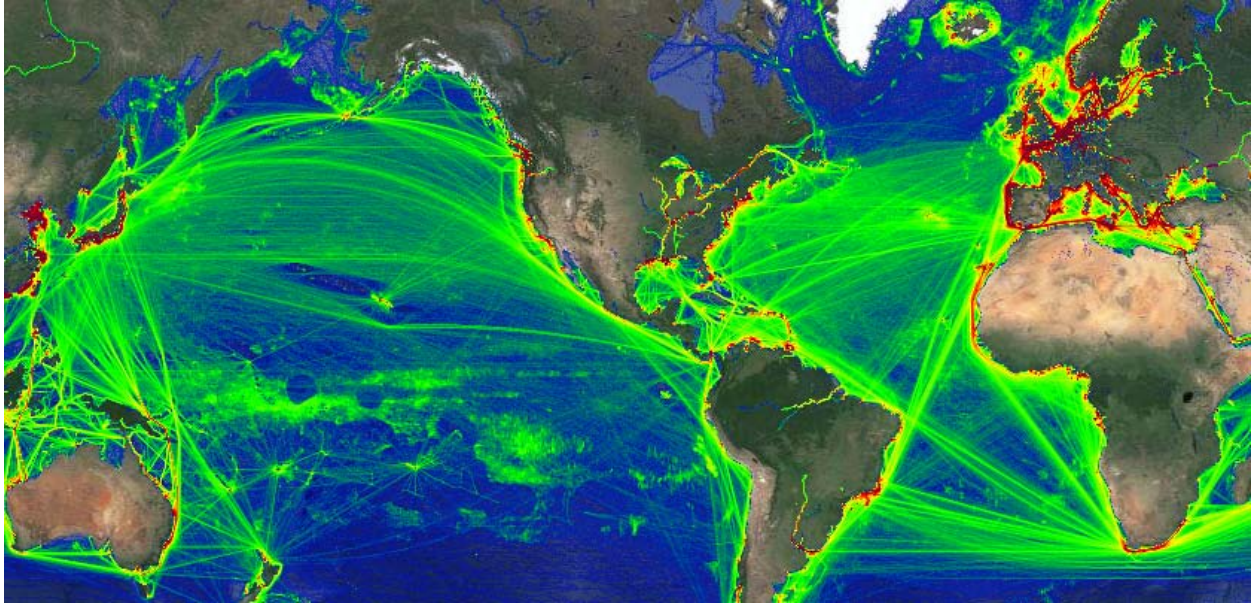
### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 TRANSPORTE MARÍTIMO

El transporte marítimo es una de las formas de transporte que permite mover mercancías de un lugar a otro del planeta trasladando el volumen más grande de productos a mayores distancias que cualquier otro medio. En consecuencia, el intercambio comercial internacional se realiza principalmente a través del mar. (INEGI)

Dicho eso, México es un país clave para el transporte marítimo internacional entre Asia, Europa y el Continente Americano. México tiene puertos de altura, que atienden embarcaciones, personas y bienes en navegación entre puertos nacionales y puertos del extranjero, los cuales se encuentran tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico. En este tipo de puertos los barcos grandes y pesados pueden cargar y descargar sus mercancías, por ejemplo los buques-tanque utilizados para transportar petróleo crudo desde los pozos mexicanos hacia otros lugares del mundo. El país también tiene puertos de cabotaje, que sirven para barcos pequeños o medianos que navegan cerca de la costa entre puertos terminales dentro del mismo. Todos ellos contribuyen generando emisiones de contaminantes en aguas cercanas al territorio mexicano.

En la *figura 3.1* se muestran las principales rutas marítimas del mundo en donde se observa que una parte del comercio marítimo entre China, Europa y los Estados Unidos pasa cerca de las costas mexicanas para dirigirse al Canal de Panamá y así llegar a su destino. Se observa, entonces, que las costas del Pacífico y el Golfo de México son análogas a una autopista y que es necesario conocer el efecto de las emisiones de los buques en el país.



**Figura 3.1** Rutas marinas principales del mundo.

Fuente: <http://www.marinetraffic.com/es/ais/home/centerx:-99/centery:23/zoom:5>

## **3.2 CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

La contaminación del aire generalmente se define como una condición atmosférica en la cual algunas sustancias están presentes en concentraciones más altas que sus niveles normales en el ambiente y que producen efectos negativos en la salud, animales, vegetación o materiales.

El transporte regional de contaminantes hace de la contaminación del aire un problema que no se puede confinar solamente a las áreas urbanas. En otras palabras las emisiones en un sitio pueden afectar la calidad del aire en otro lugar de forma considerable debido al transporte.

### **3.2.1 Fuentes de la contaminación del aire**

Las fuentes de contaminación del aire se pueden clasificar de acuerdo a su origen como naturales o antropogénicas.

### **3.2.1.1 Fuentes naturales**

Este tipo de fuentes, como su nombre lo dice, son debidas a causas naturales. Algunos ejemplos de emisiones naturales son la erosión por viento de suelos deforestados, el transporte de polvo o arena desde los desiertos, los incendios forestales (los cuales producen contaminantes relacionados con la combustión como el CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e hidrocarburos) o las erupciones volcánicas, que son importantes debido a la gran cantidad de material y gases contaminantes que pueden lanzar a la atmósfera para después ser transportados por los vientos desde lugares remotos hacia lugares donde pueden generar un impacto negativo como en las rutas de los aviones, sobre cultivos, etc.

Por otra parte, es bien conocido que la vegetación emite algunas sustancias químicas hacia la atmósfera cuya principal característica es que funcionan como precursores de ozono. También se sabe que en las zonas pantanosas puede haber presencia de metano y amoníaco debido a la descomposición de materia orgánica.

### **3.2.1.2 Fuentes antropogénicas**

Las emisiones antropogénicas son aquéllas que tienen su origen en las actividades humanas y pueden clasificarse en fuentes móviles, puntuales y de área.

Las *fuentes puntuales* se refieren a un punto fijo o estacionario. En esta clasificación encontramos las plantas de energía, refinerías de petróleo así como la gran cantidad de industrias manufactureras, de papel, químicas, farmacéuticas, etc. que arrojan contaminantes a la atmósfera. A menudo se les asocia con emisiones de dióxido de carbono, dióxido de azufre, dióxidos de nitrógeno entre otros compuestos.

Dentro de las *fuentes móviles* encontramos las emisiones debidas a los diferentes tipos de transporte como lo son los automóviles, camiones, embarcaciones marinas, aviones, etc. Generalmente se les asocia con emisiones de monóxido de carbono, dióxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.

Las *fuentes de área* están asociadas a una serie de fuentes pequeñas, generalmente numerosas y dispersas, que no pueden ser identificables individualmente,

pero que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región. Ejemplos de estas fuentes son el consumo de leña o gas, el uso de pinturas y solvente, el asfaltado, etc.

### **3.3 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN**

La necesidad de controlar la contaminación atmosférica yace en los efectos que ésta tiene en la salud de los humanos, los animales o la vegetación. Además causa deterioro de los materiales de construcciones y puede afectar el tiempo y clima. Algunos de los efectos son relativamente fáciles de medir como lo son el daño a la vegetación o la reducción de la visibilidad pero existen otros que son más difíciles de calcular, por ejemplo, los efectos en la salud de los seres humanos y animales debido a que éstos pueden presentarse después de mucho tiempo de exposición.

#### **3.3.1 Efectos en la salud**

Los estudios sobre los efectos en la salud han identificado algunos problemas relacionados con la contaminación, por ejemplo, la irritación de ojos está asociado con altas concentraciones de oxidantes como peroxiacetilnitrato, aldehídos y partículas. También están asociadas con la contaminación la bronquitis, cáncer de pulmón, asma, infecciones respiratorias, entre otras. En algunos casos personas que ya presentan algún problema de salud pueden ver agravado su estado de salud al exponerse a niveles altos de contaminación en el aire.

#### **3.3.2. Efectos en la vegetación**

Se ha identificado que un gran número de árboles son dañados por la contaminación del aire. Los efectos más comunes son el daño de las hojas, retraso en el crecimiento (en altura y grosor) de los árboles o la disminución en el tamaño de las frutas expuestos a concentraciones altas de contaminantes.

Entre los contaminantes identificados que generan el mayor daño en las plantas se encuentran el dióxido de azufre, etileno, fluoruros, ozono, partículas y algunos oxidantes orgánicos.

### **3.3.3 Efectos en las estructuras y materiales**

Los contaminantes atmosféricos afectan los materiales al ensuciarlos o reaccionando químicamente con ellos por lo que producen daño a metales, a las estructuras de las construcciones, al papel, caucho y otros materiales. Esto sucede de manera extensa y generalmente se atribuyen estos efectos a la lluvia ácida, a oxidantes, al sulfuro de hidrógeno y al material particulado.

### **3.3.4 Efectos en el tiempo y clima**

- Disminución del ozono estratosférico

Es un problema que preocupa bastante debido a que la capa de ozono estratosférico protege la vida en el planeta de los rayos ultravioleta emitidos por el sol. El ozono es eliminado a través de una serie de reacciones químicas por compuestos halogenados como los clorofluorocarbonos, los cuales son comúnmente usados como propelentes en aerosoles, refrigerantes, agentes limpiadores en circuitos impresos, etc.

- Efectos en el clima

Uno de los efectos más preocupantes es el efecto radiativo que producen algunos gases como el dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, clorofluorocarbonos y ozono troposférico, entre otros. Estos gases contribuyen intensificando el efecto invernadero sobre el planeta incrementando la temperatura media del mismo.

Por otro lado se ha encontrado que un aumento en la concentración de aerosoles en la atmósfera contribuyen al enfriamiento de la superficie terrestre al dispersar una porción de la radiación que llega del sol, por lo que este efecto es opuesto al que producen los gases de efecto invernadero, es decir, disminuyen la temperatura del planeta. No obstante, el efecto de los aerosoles en el clima aún sigue bajo estudio (IPCC 2013).

### 3.4 QUÍMICA DEL OZONO

La formación de ozono troposférico se atribuye por lo general al ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno. Este compuesto se disocia según la reacción 1 en monóxido de nitrógeno y oxígeno monoatómico. Esta es una de las reacciones fotoquímicas más importantes en la atmósfera inferior, puesto que produce el oxígeno monoatómico, O, altamente reactivo. Después el O se combina con el O<sub>2</sub> (en presencia de una molécula de aire) para formar ozono mediante la reacción 2. En seguida, el ozono oxida el monóxido de nitrógeno a dióxido de nitrógeno completándose el ciclo. En resumen, el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno se puede representar por las ecuaciones 1-3.



#### 3.4.1 Los hidrocarburos en la fotoquímica atmosférica

La complejidad creciente de las reacciones atmosféricas se debe a la presencia de una gran variedad de hidrocarburos por lo que todavía no se ha podido describir en su totalidad la fotoquímica en la atmósfera inferior. Sin embargo, dos procesos que conducen al aumento en las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. Por un lado, una pequeña parte del oxígeno atómico formado por la reacción 1 es capaz de reaccionar con varios compuestos orgánicos para formar radicales libres (reacción 4) y por otro, el ozono formado por la reacción 2 reacciona con alquenos produciendo compuestos carbonílicos y radicales libres.



Los radicales libres pueden reaccionar con el oxígeno molecular para formar radicales peróxido, (ROO·), los cuales a su vez oxidan el monóxido de nitrógeno:



Por lo tanto, estas reacciones aumentan la producción de NO<sub>2</sub> más allá de lo debido al ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno por lo que la secuencia de reacciones 4 y 5 proporciona un mecanismo que podría aumentar la concentración de ozono.

Por otra parte, la reacción 5 tiene mayor peso que la reacción 3 en la oxidación del NO al NO<sub>2</sub> debido a su cinética, en consecuencia, la reacción 3 no representa un papel dominante en la reducción de la concentración de ozono. En contraste, la reacción del O<sub>2</sub> con radicales peróxido puede ser una fuente adicional de ozono de acuerdo con la reacción 6:



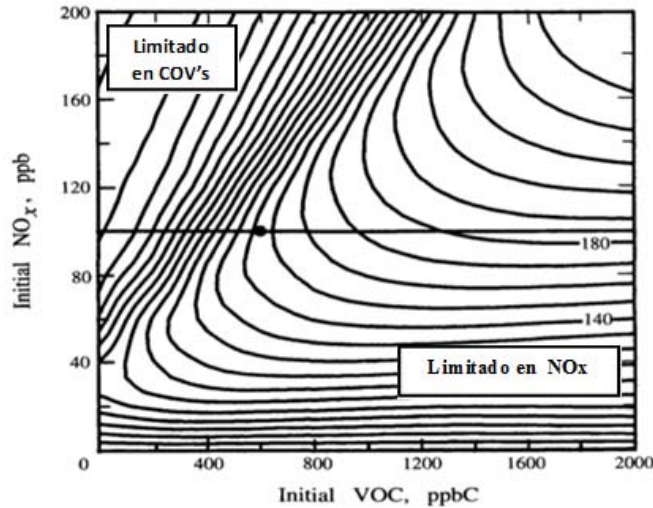
Las reacciones 5 y 6 podrían entonces contribuir a un aumento rápido en la concentración de ozono a media mañana.

### **3.4.2 La no linealidad en la formación de ozono troposférico**

La figura 3.2 muestra lo complejo que es el proceso de generación de ozono en la tropósfera. Se muestran dos zonas, una limitada en NO<sub>x</sub> (concentración baja comparadas con COV's) y otra limitada en COV's (concentración baja comparada con NO<sub>x</sub>). Además líneas curvas que representan la concentración de ozono.

Se observa que en la zona limitada en NO<sub>x</sub> una disminución de estos compuestos se traduce en una reducción en la concentración de ozono mientras que una disminución en los COV's tendrá un efecto casi nulo. Por otra parte en la zona limitada en compuestos orgánicos volátiles, una disminución de NO<sub>x</sub> se traduce en un aumento en la concentración de ozono mientras que una disminución de COV's en una reducción del contaminante. Por lo que es evidente que no siempre la disminución de alguno de estos precursores tendrá el efecto deseado por lo que este proceso es no lineal y dependerá de las características propias de la región de estudio.





**Figura 3.2** Ejemplo de un diagrama isoplético para el ozono.

Fuente: Sein, J., Pandis S., 2006, p.237

### 3.5 PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS

El material particulado consiste en una mezcla de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire. Su tamaño, forma y composición pueden variar dependiendo de su origen y de los procesos físicos o químicos a los que se sometan.

Su origen puede ser natural o antropogénico. Entre los procesos naturales implicados se puede encontrar la polinización de plantas o los incendios forestales así como las erupciones volcánicas. Por otra parte, entre de las fuentes antropogénicas más comunes podemos encontrar la quema de combustibles. También es posible clasificar a las partículas en base a si son emitidas directamente a la atmósfera (primarias) o se producen por reacciones de algunos gases en la atmósfera (secundarias).

#### 3.5.1 Clases de partículas atmosféricas

Generalmente las partículas atmosféricas pueden provenir de alguna de las siguientes fuentes:

*Materia mineral:* El material particulado de origen natural constituye la fracción mayoritaria del aerosol atmosférico en cuanto a masa. Las partículas minerales se

originan por la acción de los vientos sobre la superficie terrestre por lo que este tipo de partícula toma importancia en zonas áridas.

*Aerosol marino:* Al igual que el material particulado mineral, las partículas de aerosol marino son en su mayoría de origen natural y son emitidas directamente a la atmósfera al ser arrastradas por el viento desde superficie marina.

*Compuestos de azufre:* Los sulfatos presentes en la atmósfera son generalmente partículas de origen secundario, no emitidos directamente a la atmósfera sino que se forman principalmente por la oxidación de dióxido de azufre.

*Compuestos de nitrógeno:* Los compuestos de nitrógeno en la atmósfera, principalmente nitratos y compuestos de amonio, son en general de origen secundario y provienen de la reacción de precursores naturales y antropogénicos.

*Compuestos de carbono:* Los compuestos carbonosos comprenden una amplia variedad de especies naturales y antropogénicas de composición y estructura diversa. Generalmente los compuestos carbonosos se subdividen en carbono elemental y materia orgánica, aunque es posible encontrar dependiendo de la región de análisis pequeñas cantidades de carbonatos (de calcio y magnesio principalmente) en la atmósfera.

### **3.5.2 Tamaño de partícula**

Debido al gran espectro de tamaño de partícula que existe es necesario clasificarlas de acuerdo a sus dimensiones. Además, de esta manera se pueden separar los efectos que tienen en la salud dependiendo de su tamaño. Entre menor sea su tamaño pueden penetrar más fácilmente en los pulmones y producir algún tipo de reacción en el cuerpo debido a las características fisicoquímicas de sus componentes.

Generalmente se definen cuatro parámetros dependiendo del tamaño de las mismas: TPS, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>. El término TSP se refiere al total de partículas en suspensión, PM<sub>10</sub> al conjunto de partículas menores a diez micrómetros, PM<sub>2.5</sub> al grupo de partículas menores a 2.5 micrómetros y de forma análoga aplica para las PM<sub>1</sub>.

## 4. METODOLOGÍA

Se realizaron simulaciones con el modelo WRF-Chem para dos escenarios: el primero consistió en una simulación tomando en cuenta las emisiones de buques a lo largo de la zona de influencia en el Océano Pacífico y el Golfo de México y el segundo escenario se basó en realizar una simulación sin tomar en cuenta las emisiones de los buques. El modelo se alimentó con datos de reanálisis obtenidos de la página web de NCAR<sup>1</sup> con 1º de resolución, los cuales se construyeron con el mismo modelo que el NCEP (National Centers for Environmental Prediction) usa en el sistema de pronóstico global (GFS). El dominio de estudio consistió en una malla de 200 x 100 celdas con una resolución de 27.75 km. Además el modelo se alimentó con datos del Inventario Nacional de Emisiones del año 2008 con el objetivo de simular los procesos químicos en la atmósfera.

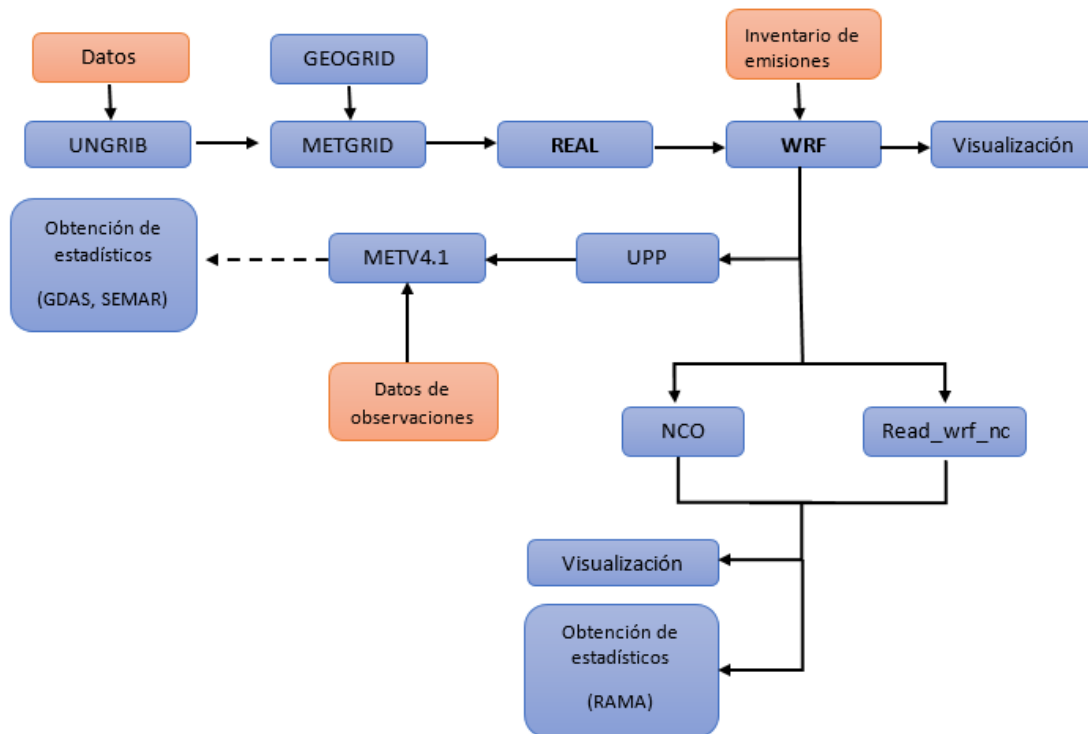
También se evaluó el desempeño del modelo con el conjunto de herramientas UPP y METV4.1 (Ver Anexo 9.4) mediante el cual se obtienen valores estadísticos de las comparaciones entre los datos del modelo y las observaciones. Se usaron bases de datos de observaciones GDAS (Global Data Assimilation System) y SEMAR (Secretaría de Marina) para evaluar las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa y las componentes zonal y meridional del viento. Con respecto a las variables químicas, (O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>) se usó la base de datos de la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico) para realizar las comparaciones con datos de observaciones.

En la figura 4.1 se resume el procedimiento señalado anteriormente y llevado a cabo en el presente trabajo de investigación.

---

<sup>1</sup> <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>

<sup>2</sup> [http://rda.ucar.edu/datasets/ds337.0/index.html#forms/337\\_subset.php?\\_da=y](http://rda.ucar.edu/datasets/ds337.0/index.html#forms/337_subset.php?_da=y)



**Figura 4.1** Diagrama detallado del proceso de modelación con el WRF y la evaluación de su desempeño.

La descripción del modelo WRF-Chem y el procedimiento llevado a cabo al realizar las simulaciones se encuentran en los Anexos 9.1 y 9.2 mientras que las descripciones de las herramientas usadas (UPP, METV4.1, NCO, etc.) del Anexo 9.3 hasta el Anexo 9.5.

Ahora bien, como ya se mencionó antes se evaluaron dos escenarios con el objetivo de determinar el impacto en la calidad del aire a causa de las emisiones marítimas:

- 1) **Escenario 1:** Simulación con las emisiones de todo el dominio.
- 2) **Escenario 2:** Simulación con las emisiones marítimas apagada

#### 4.1 ESCENARIO 1

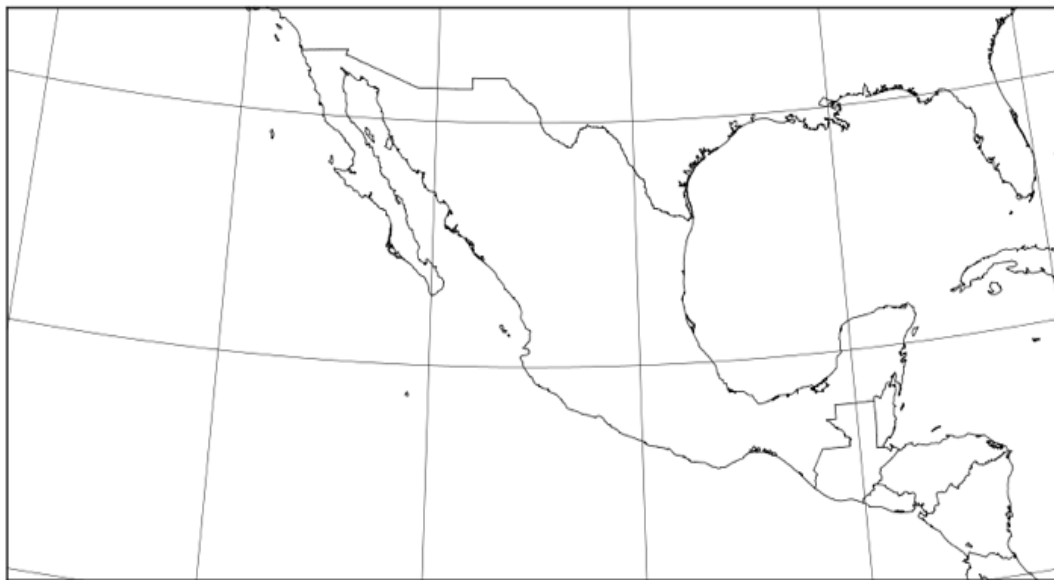
##### 4.1.1 Obtención de datos y dominio de estudio

Se descargaron los archivos y que contienen la información de reanálisis meteorológica de la página web de NCAR con 1º grado de resolución cada seis horas, esto para

cuatro diferentes semanas del año 2011, cada una dentro de una estación de año diferente:

- 09 a 16 de febrero
- 15 a 22 de mayo
- 30 de agosto a 06 de septiembre
- 20 a 27 de noviembre

El dominio seleccionado para realizar las simulaciones con el modelo consiste en una malla de 200 x 100 celdas, con una resolución de 27.75 km, con latitudes que van desde 8.8° N a 35.61° N y con longitudes desde 135.13° W hasta 76.25° W (Figura 4.2).

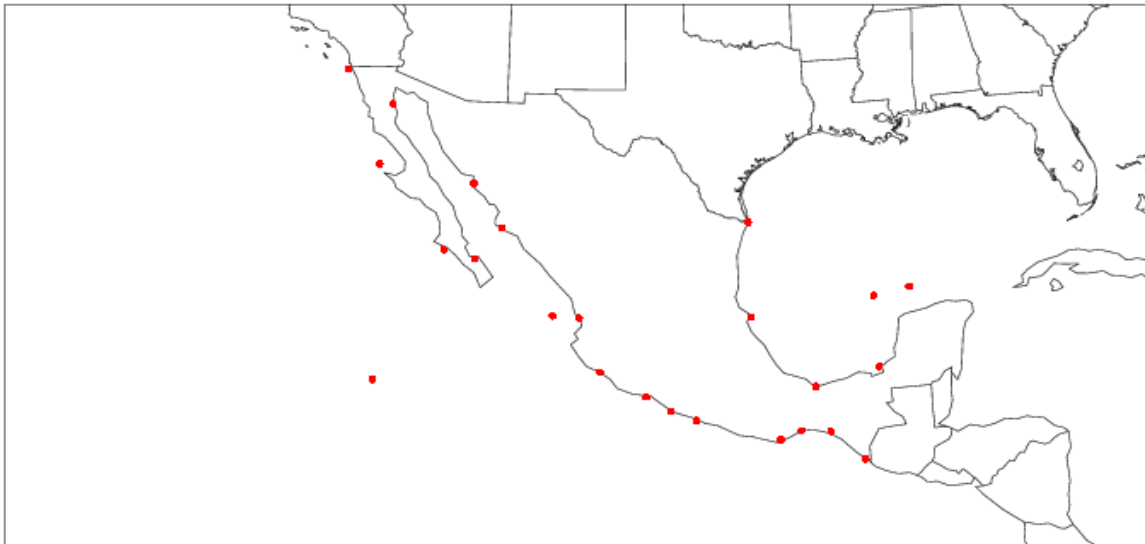


**Figura 4.2** Dominio de modelación seleccionado.

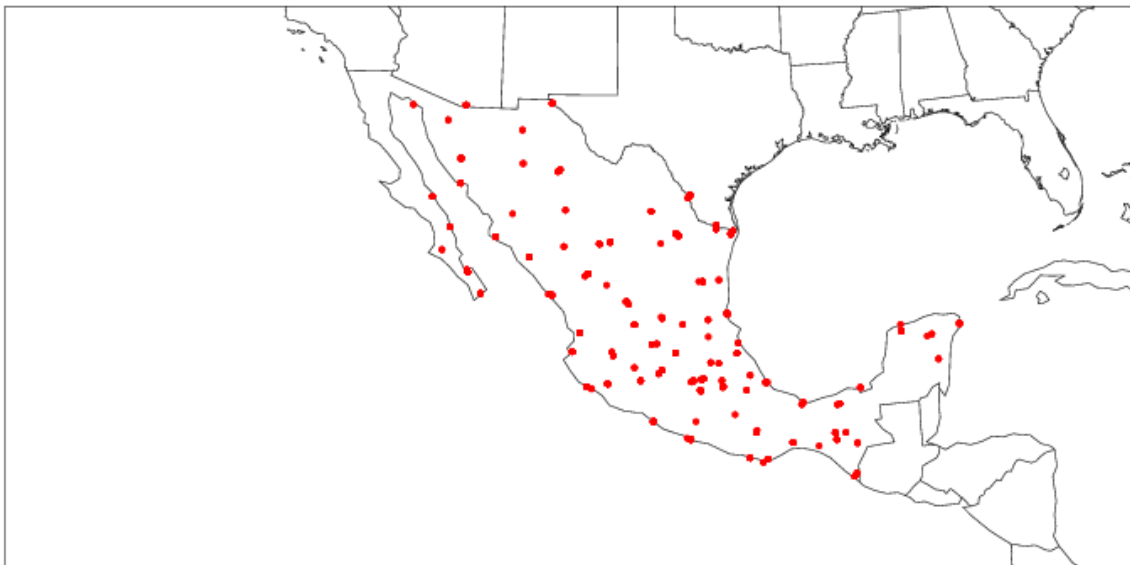
A continuación, se adquirieron los datos de observaciones meteorológicas facilitados por la Secretaría de Marina (SEMAR) y por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de donde se obtuvieron datos GDAS (Global Data Assimilation System). Asimismo se obtuvieron los datos de mediciones de compuestos químicos de las estaciones de monitoreo en el centro del país proporcionados por la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico).

### 4.1.2 Análisis estadístico

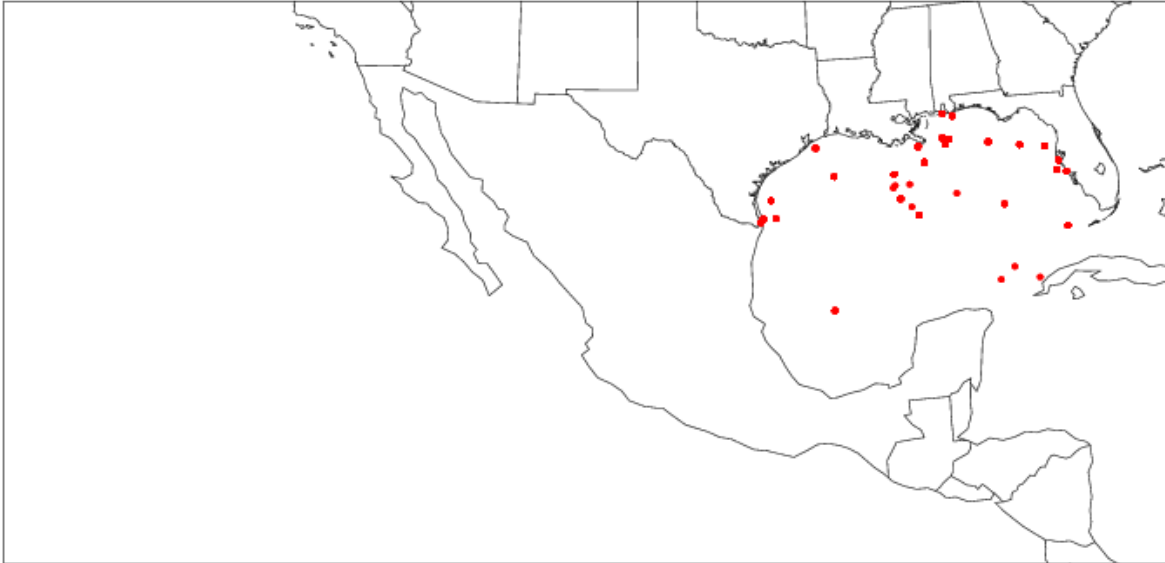
Una vez que el modelo generó los archivos de salida se continuó con el análisis de los mismos mediante el uso de las herramientas UPP (*Unified Post Processor; Anexo 9.3*) y METV4.1 (*Model Evaluation Tools Version 4.1; Anexo 9.4*) para el cálculo de estadísticos con los datos de observaciones de GDAS (sobre la superficie terrestre, el Golfo de México y el Océano Pacífico) y SEMAR. En seguida se muestran los mapas de la ubicación de las estaciones para cada base de datos.



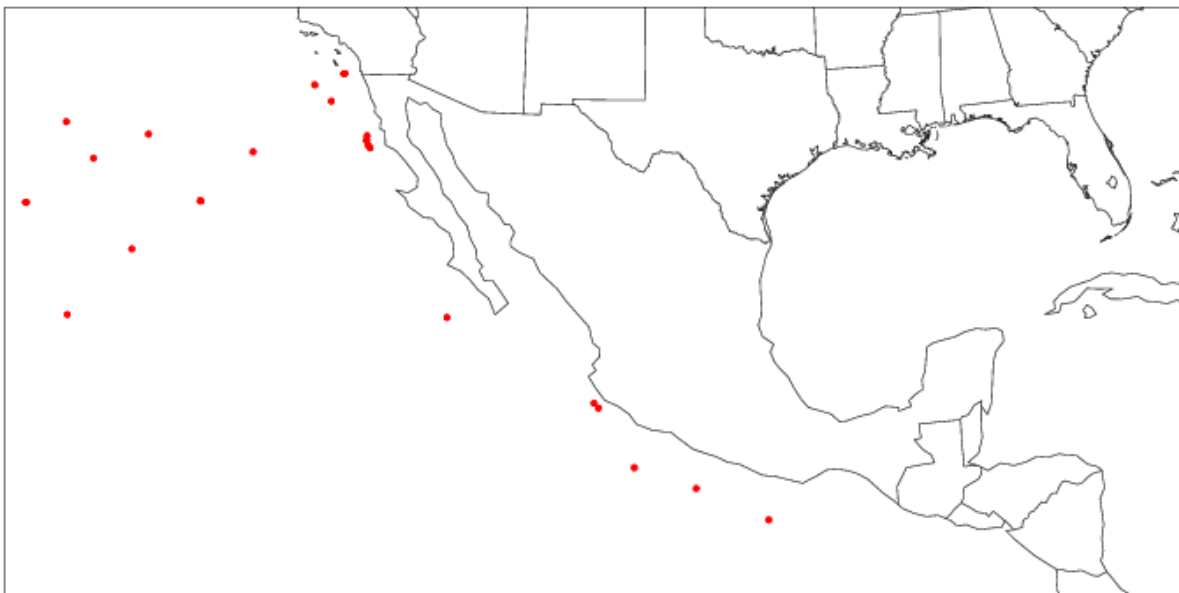
**Figura 4.3** Ubicación de las estaciones de medición para la base de datos de SEMAR.



**Figura 4.4** Ubicación de las estaciones de medición para la base de datos GDAS en superficie terrestre.



**Figura 4.5** Estaciones de medición marítimas para la base de datos GDAS en el Golfo de México.



**Figura 4.6** Estaciones de medición marítimas para la base de datos GDAS en el Océano Pacífico.

Las figuras 4.3-4.6 muestran la ubicación de la mayoría de las estaciones de medición para cada uno de los cuatro periodos elegidos del año en este trabajo de investigación, pudiendo existir diferencias de un periodo a otro principalmente debido a que las estaciones dejan de funcionar o entran en mantenimiento por algún tiempo.

Con respecto a la base de datos de la RAMA, se obtuvieron los datos para cada una de las estaciones desde la base de datos en la página web<sup>2</sup>. Después, con el fin de poder comparar los datos de mediciones con el resultado del modelo, se obtuvo una ubicación promedio de las estaciones en el centro del país, es decir, una latitud promedio y una longitud promedio. Una vez hecho lo anterior se usó el programa *read\_wrf\_nc* para extraer de forma horaria las variables correspondientes al ozono y al  $PM_{2.5}$  de las salidas del modelo.

A continuación se hizo un tratamiento a los datos observacionales. Se obtuvo el promedio horario de todas las estaciones funcionales en el centro del país para los periodos seleccionados y para cada una de las variables químicas. Posteriormente, para el ozono se obtuvo el valor máximo para cada día, tanto para los datos observados (usando el promedio horario de las estaciones de medición) como para los pronósticos (extraídos con *read\_wrf\_nc*). A partir de los valores resultantes se calcularon algunas variables estadísticas como las desviaciones estándar de los pronósticos y de las observaciones, el coeficiente de correlación de Pearson o el RMSE (raíz del error cuadrático medio)

Con respecto al  $PM_{2.5}$  se obtuvo el promedio diario tanto para las observaciones (a partir de los valores promedio horarios de las estaciones) como los pronósticos (obtenidos con *read\_wrf\_nc*). A partir de aquí se procedió a calcular las mismas variables estadísticas que para el caso del ozono.

Además de los estadísticos se generaron gráficas de caja y bigotes con el fin de visualizar el valor del pronóstico del modelo sobre los datos observacionales, es decir, en qué región del conjunto de observaciones se encuentra el valor arrojado por el modelo: en la región donde se encuentran los valores más pequeños, los valores más grandes, los valores centrales o simplemente es un valor extremo. Cabe resaltar que para la realización de estudios de impacto a la salud se recomienda usar el promedio

---

<sup>2</sup> [http://rda.ucar.edu/datasets/ds337.0/index.html#forms/337\\_subset.php?\\_da=y](http://rda.ucar.edu/datasets/ds337.0/index.html#forms/337_subset.php?_da=y)



anual de PM<sub>2.5</sub> y el máximo diario de ozono. Es por esto que para el presente trabajo de investigación se usaron estas medidas.

## 4.2 ESCENARIO 2

Se editó un programa en lenguaje Fortran (Anexo 9.17) capaz de apagar las emisiones marítimas de los inventarios de emisiones, basándose en el uso de suelo (Tabla 4.1), por lo que cuando éste corresponde a la superficie marina se le asigna un valor de cero a las emisiones localizadas en la segunda capa del inventario de emisiones, dejando intactas las emisiones terrestres.

**Tabla 4.1** Categorías de uso de suelo del WRF

Land Use Category	Land Use Description
1	Urban and Built-up Land
2	Dryland Cropland and Pasture
3	Irrigated Cropland and Pasture
4	Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture
5	Cropland/Grassland Mosaic
6	Cropland/Woodland Mosaic
7	Grassland
8	Shrubland
9	Mixed Shrubland/Grassland
10	Savanna
11	Deciduous Broadleaf Forest
12	Deciduous Needleleaf Forest
13	Evergreen Broadleaf
14	Evergreen Needleleaf
15	Mixed Forest
16	Water Bodies
17	Herbaceous Wetland
18	Wooden Wetland
19	Barren or Sparsely Vegetated
20	Herbaceous Tundra
21	Wooded Tundra
22	Mixed Tundra
23	Bare Ground Tundra
24	Snow or Ice

Fuente: User's Guide Weather Research & Forecasting, 2014, p 3-60

Una vez generados los inventarios sin emisiones marítimas se realizó otra simulación utilizando el procedimiento anteriormente descrito para el Escenario 1. Utilizando los archivos de salida de ambos escenarios, se obtuvo para cada una de las semanas un archivo que corresponde al máximo de concentración para el Escenario 1 y otro archivo que corresponde al máximo de concentración para el Escenario 2 para ozono y PM<sub>2.5</sub>. A partir de estos archivos y usando *NCO* (Anexo 9.5) se obtuvo la diferencia entre ambos escenarios. Los máximos y las diferencias entre escenarios se visualizaron en los programas Panoply y GrADS.

## 5. RESULTADOS

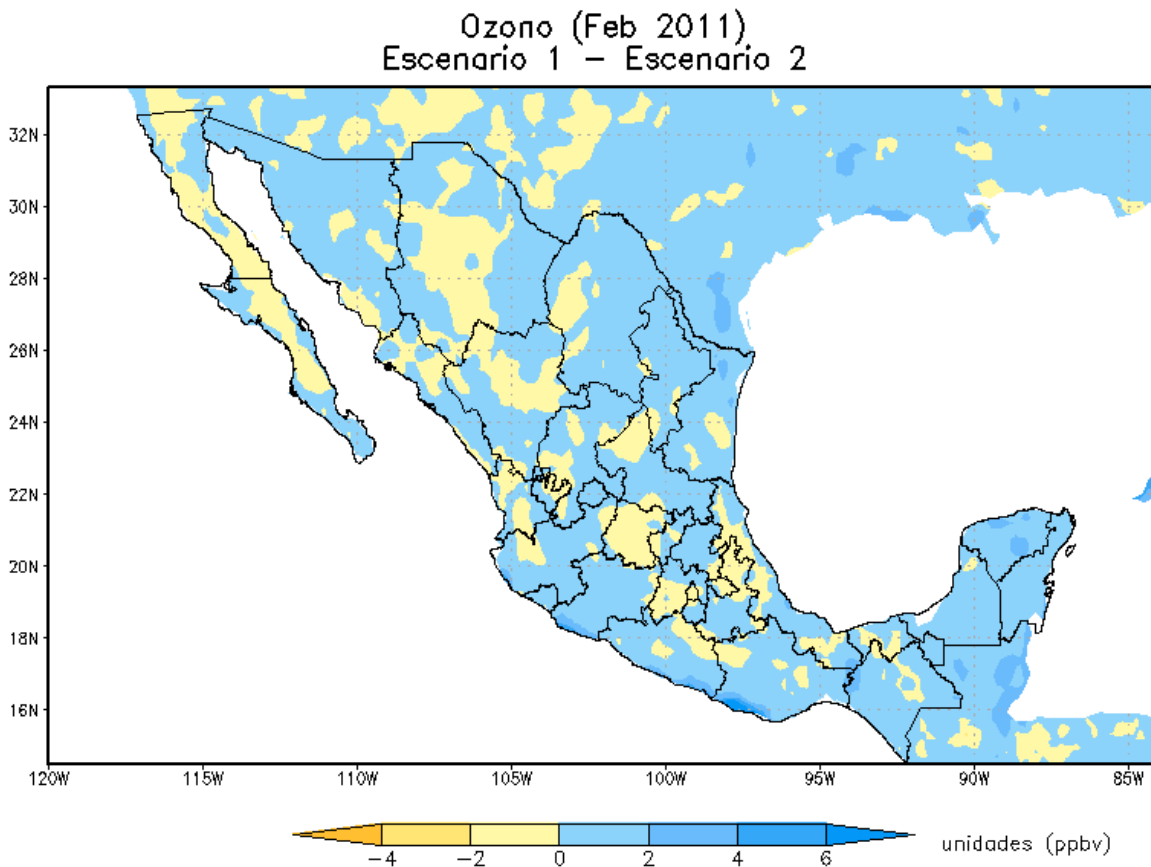
### 5.1 Evaluación del impacto de emisiones marítimas

**Escenario 1:** Modelación con WRF con emisiones marítimas

**Escenario 2:** Modelación con WRF *sin* emisiones marítimas

De la Figura 5.1 a la Figura 5.8 se muestra la diferencia entre el máximo para el *Escenario 1* y el máximo del *Escenario 2* a nivel de superficie para cada periodo, donde el color azul se interpreta como una disminución en la concentración de ozono o  $PM_{2.5}$ , mientras que un color amarillo simboliza un aumento en la concentración en el escenario 2 de estas variables químicas.

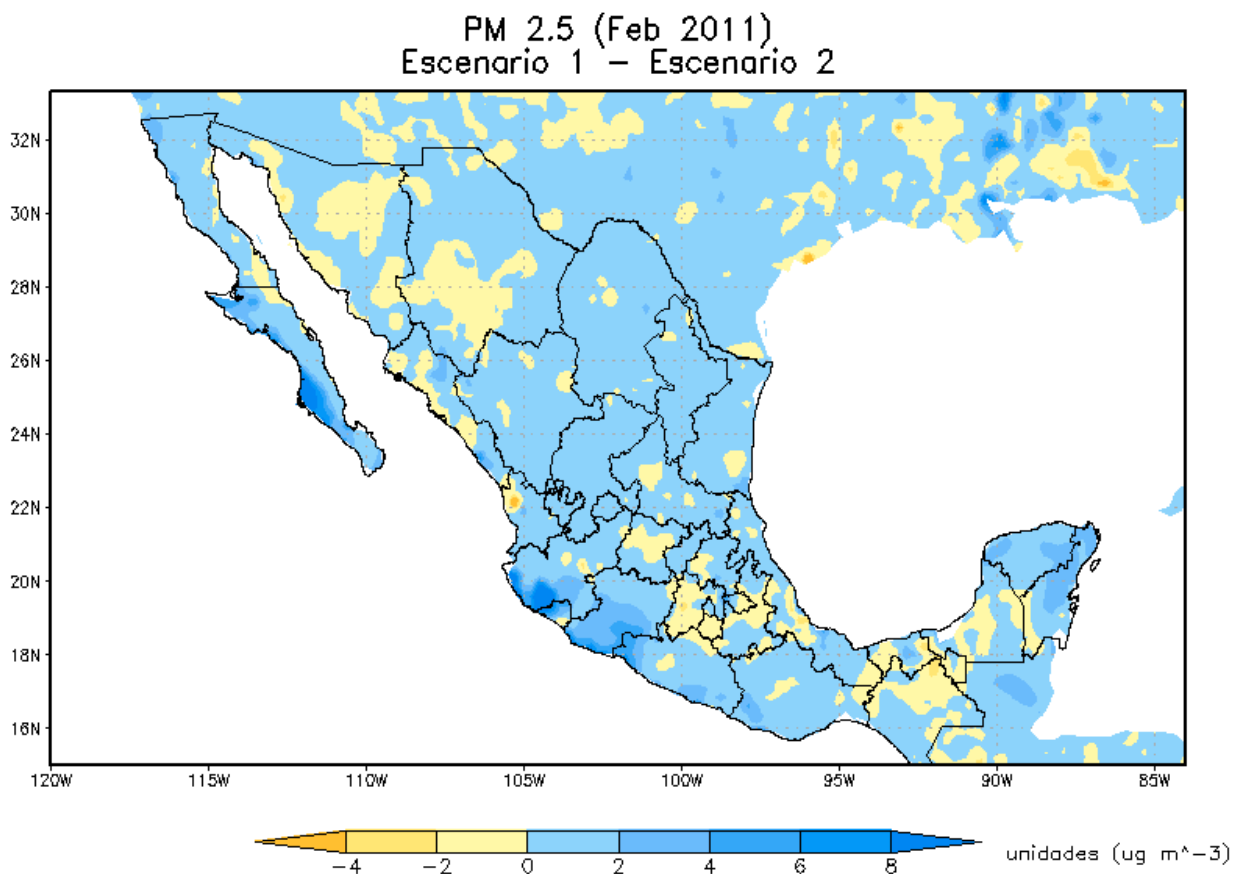
#### 5.1.1 Febrero



**Figura 5.1** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para  $O_3$  en el mes de febrero.

En la figura 5.1 se observan zonas donde existe una disminución en la concentración de ozono, especialmente en la región costera del Pacífico Central mexicano (Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Nayarit), la península de Yucatán, así como una región importante del norte del país. Esta disminución es de hasta 2 ppbv en gran parte del territorio mexicano pero existen zonas en las costas de Michoacán, Guerrero y Yucatán donde la concentración de ozono disminuye de entre 4 a 6 ppbv.

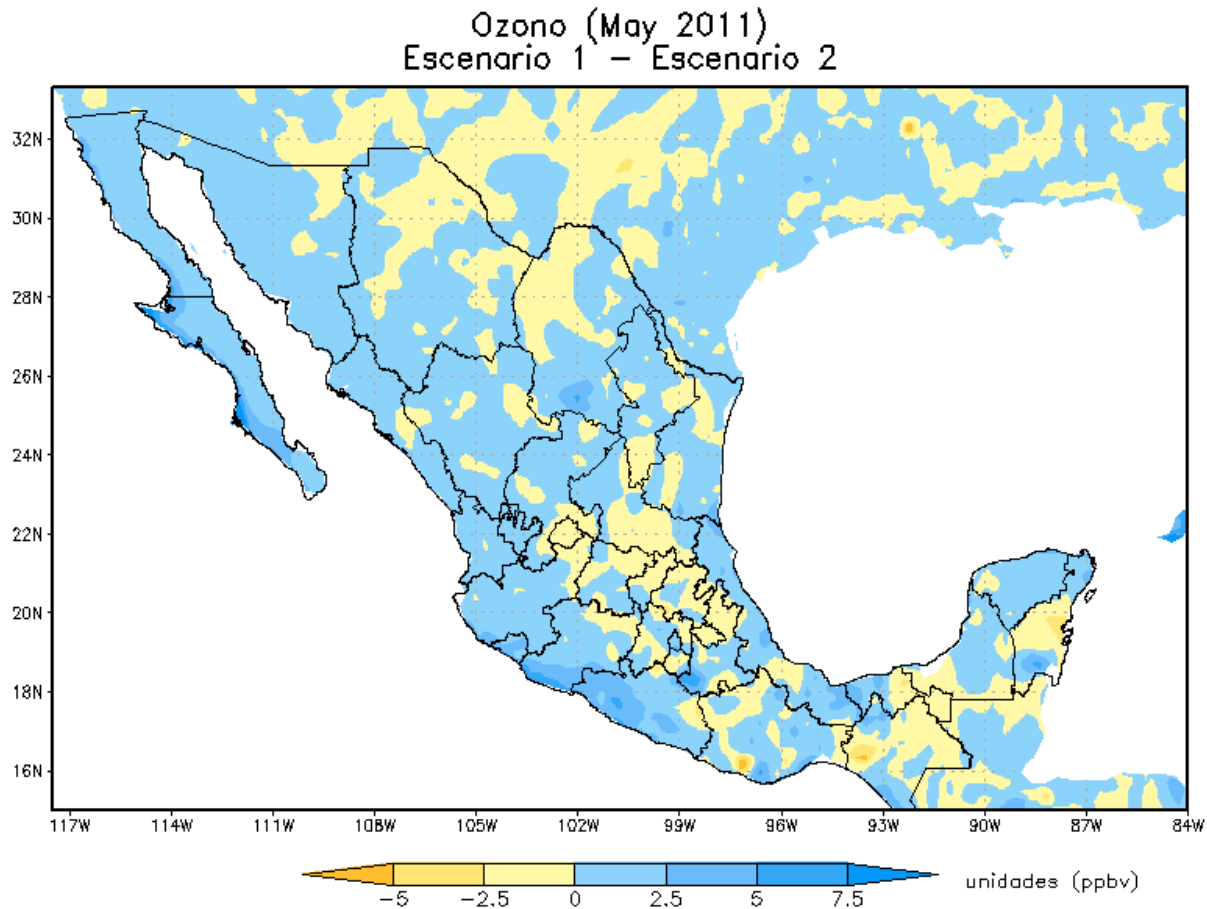
Por otra parte se muestran zonas en el centro y el noroeste del país donde el ozono aumenta hasta 2 ppbv. Esto es posible porque tanto las características químicas (Figura 3.2) y condiciones meteorológicas de la atmósfera en cada región definen el efecto de las emisiones marítimas en cada una de ellas.



**Figura 5.2** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para PM<sub>2.5</sub> en el mes de febrero.

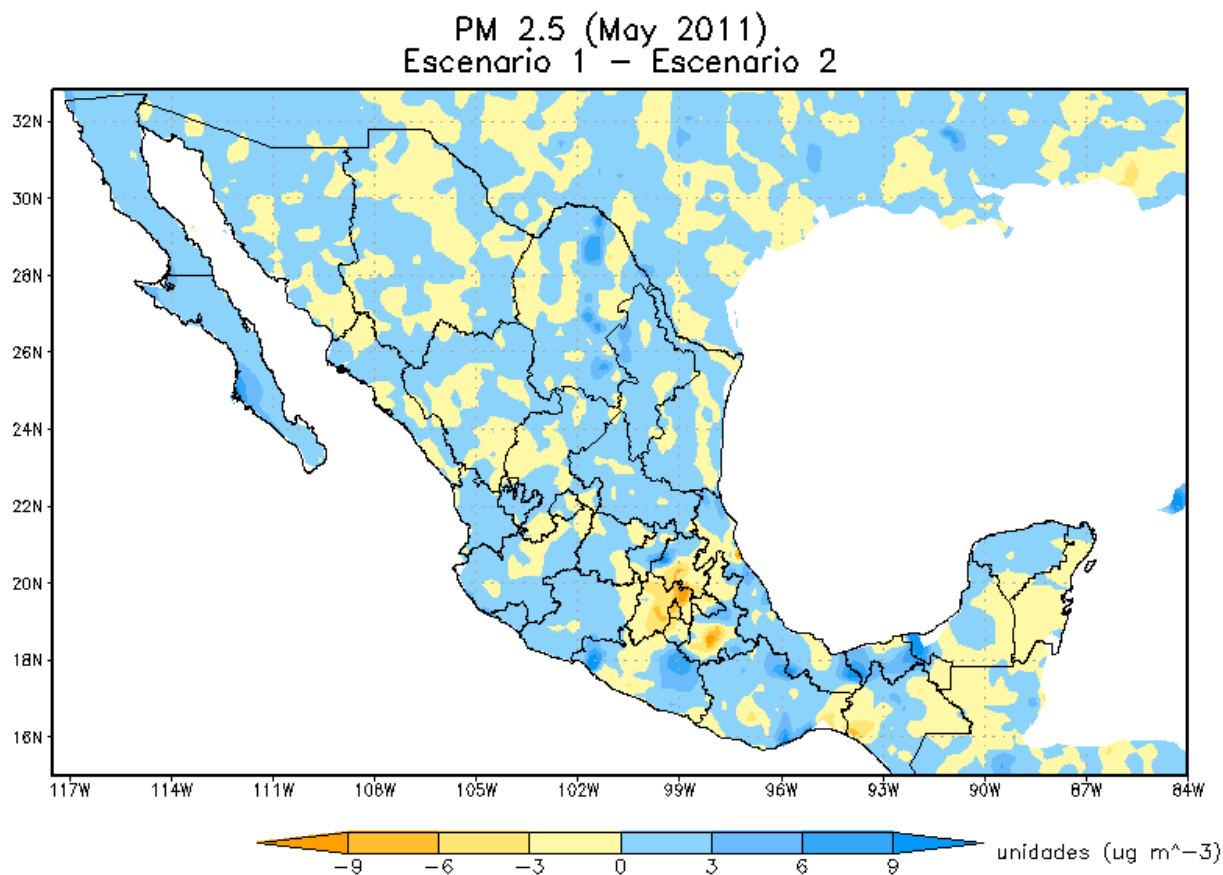
En la Figura 5.2 se muestra que el material particulado se reduce hasta  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en gran parte del territorio mexicano con algunas zonas como en las costas de Jalisco o Baja California Sur donde disminuye  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  o más. Asimismo, se observan zonas en el centro, noroeste y sureste del país donde este contaminante sufre un incremento en su concentración de hasta  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  debido a lo ya mencionado anteriormente.

### 5.1.2 Mayo



**Figura 5.3** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para  $\text{O}_3$  en el mes de mayo.

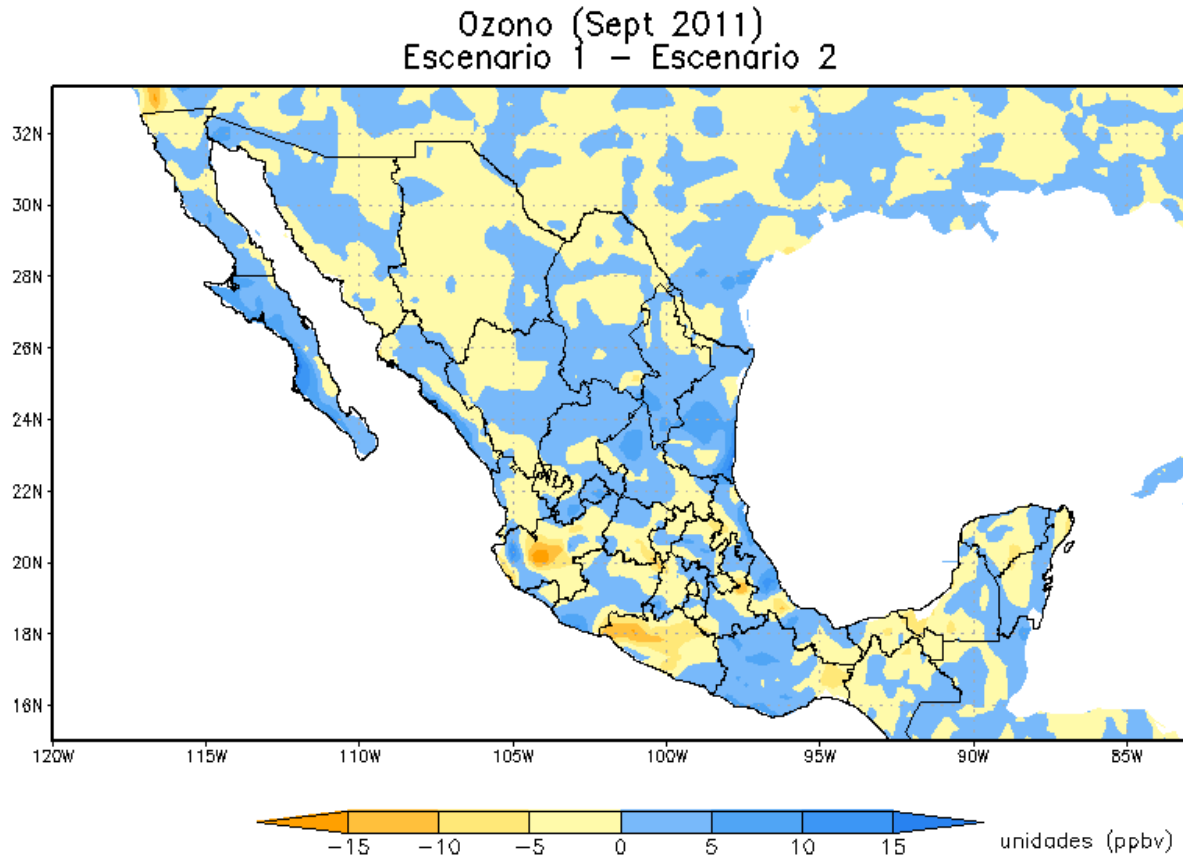
En la figura 5.3 se muestra que la concentración de ozono se vería reducida en gran parte del territorio mexicano con hasta 2.5 ppbv, no obstante, existen zonas en las costas de Michoacán, Guerrero y Baja California Sur donde el efecto es una reducción de hasta 7.5 ppbv. También se observan zonas en el centro y sureste del país donde existe un aumento de 2.5 ppbv de este contaminante o incluso mayor en puntos encontrados en el estado de Oaxaca y Chiapas.



**Figura 5.4** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para PM<sub>2.5</sub> en el mes de mayo.

En la figura 5.4 se observan zonas donde la concentración de PM<sub>2.5</sub> disminuye generalmente 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  especialmente en la península de Baja California, las costas de Michoacán, Jalisco y Yucatán aunque existen regiones en Guerrero, Oaxaca y Tabasco donde esta reducción va de 6 a 9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, también se observan zonas en el centro país donde la concentración del contaminante aumenta en más de 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En cuanto al norte del territorio mexicano, no se muestran regiones definidas que correspondan a un aumento o disminución en la concentración de PM<sub>2.5</sub> por lo que es necesario estudiar a fondo las características químicas y meteorológicas de la atmósfera en ese lugar.

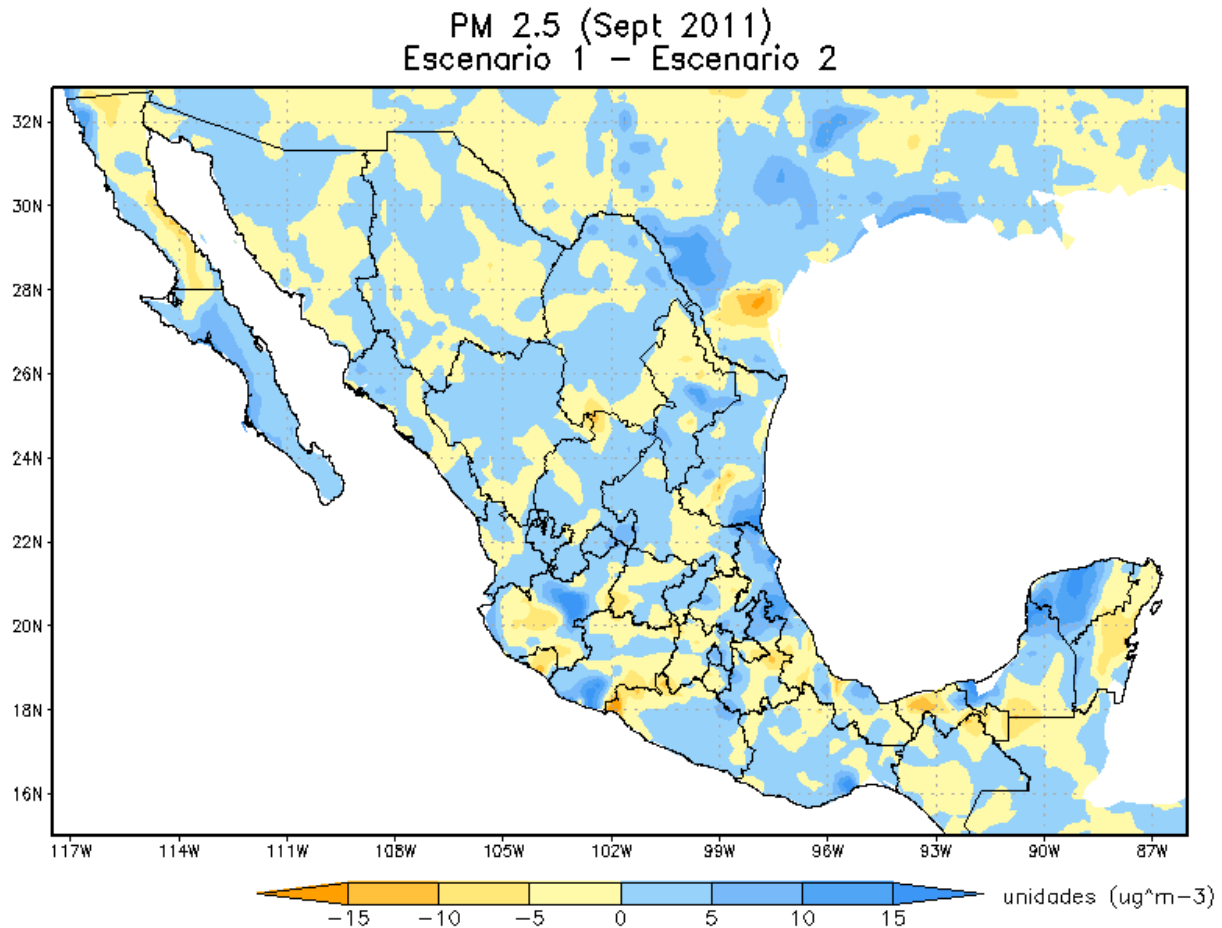
### 5.1.3 Septiembre



**Figura 5.5** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para  $O_3$  en el mes de septiembre.

En la figura 5.5 se muestra que la concentración de ozono se reduce en la península de Baja California, en las costas de Oaxaca y en la región noreste del país. En una gran parte de estas zonas el ozono se ve reducido hasta en 5 ppbv pero también se observan regiones pequeñas donde la reducción va 10 ppbv a 15 ppbv en los estados de Baja California Sur, Tamaulipas y Michoacán.

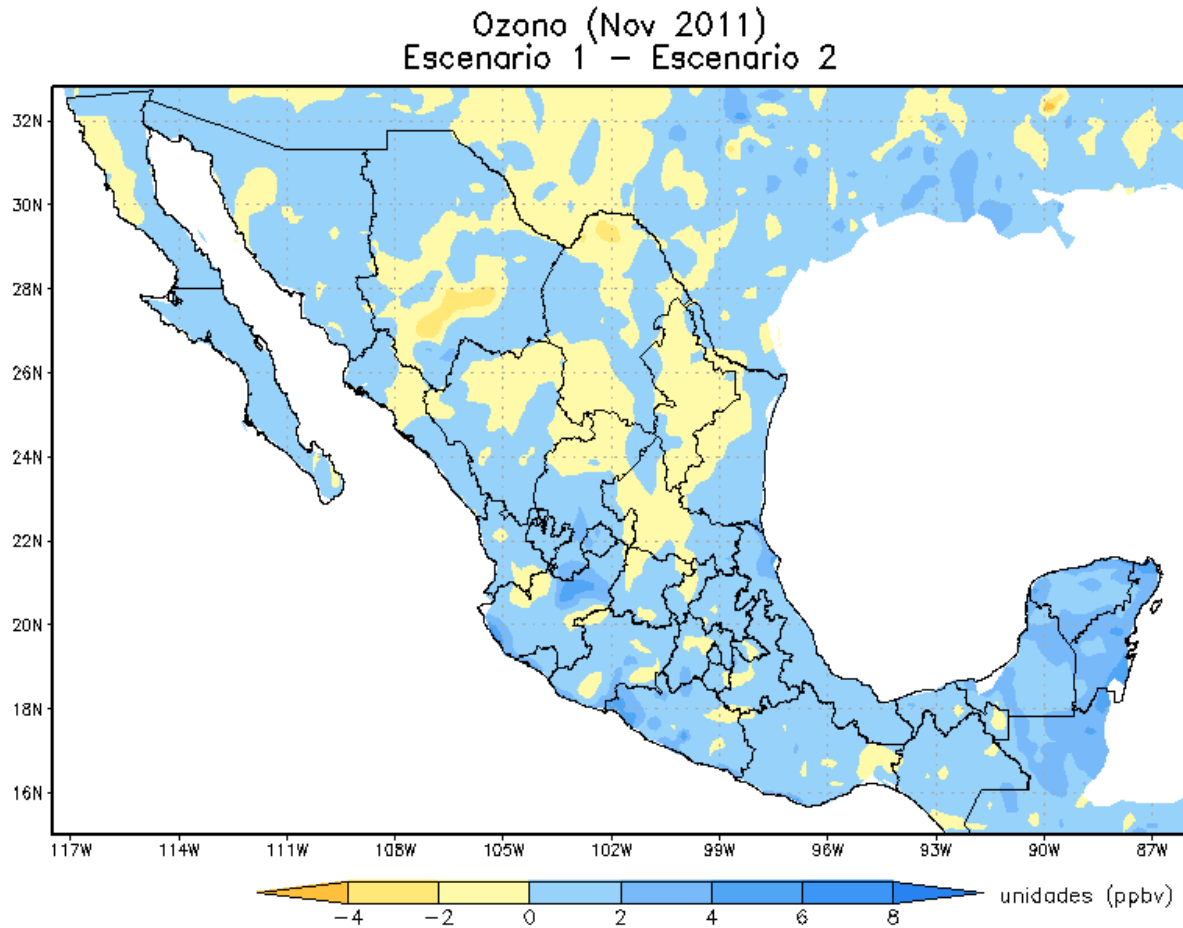
También existen zonas definidas en el noroeste, centro y sur del país donde la concentración del contaminante aumenta, especialmente en Jalisco y Guerrero donde el incremento es de 10 ppbv o mayor.



**Figura 5.6** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para  $\text{PM}_{2.5}$  en el mes de septiembre.

En la figura 5.6 se observa que la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  disminuiría en la zona del estado de Baja California, Yucatán y en las costas de Veracruz de entre 10 a  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por otro lado, en la otra parte del territorio no se observa una tendencia clara sino que existen regiones de reducción rodeadas por zonas de aumento y viceversa. Es necesario hacer una investigación más profunda acerca de lo que ocurre pero una de las posibles hipótesis que puede dar respuesta es que el mes de septiembre es un mes lluvioso y los modelos de predicción numérica del tiempo no reproducen el fenómeno de precipitación (Fundamentos de los modelos a mesoescala (2007), The Comet Program), el cual tiene un impacto en la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en la atmósfera.

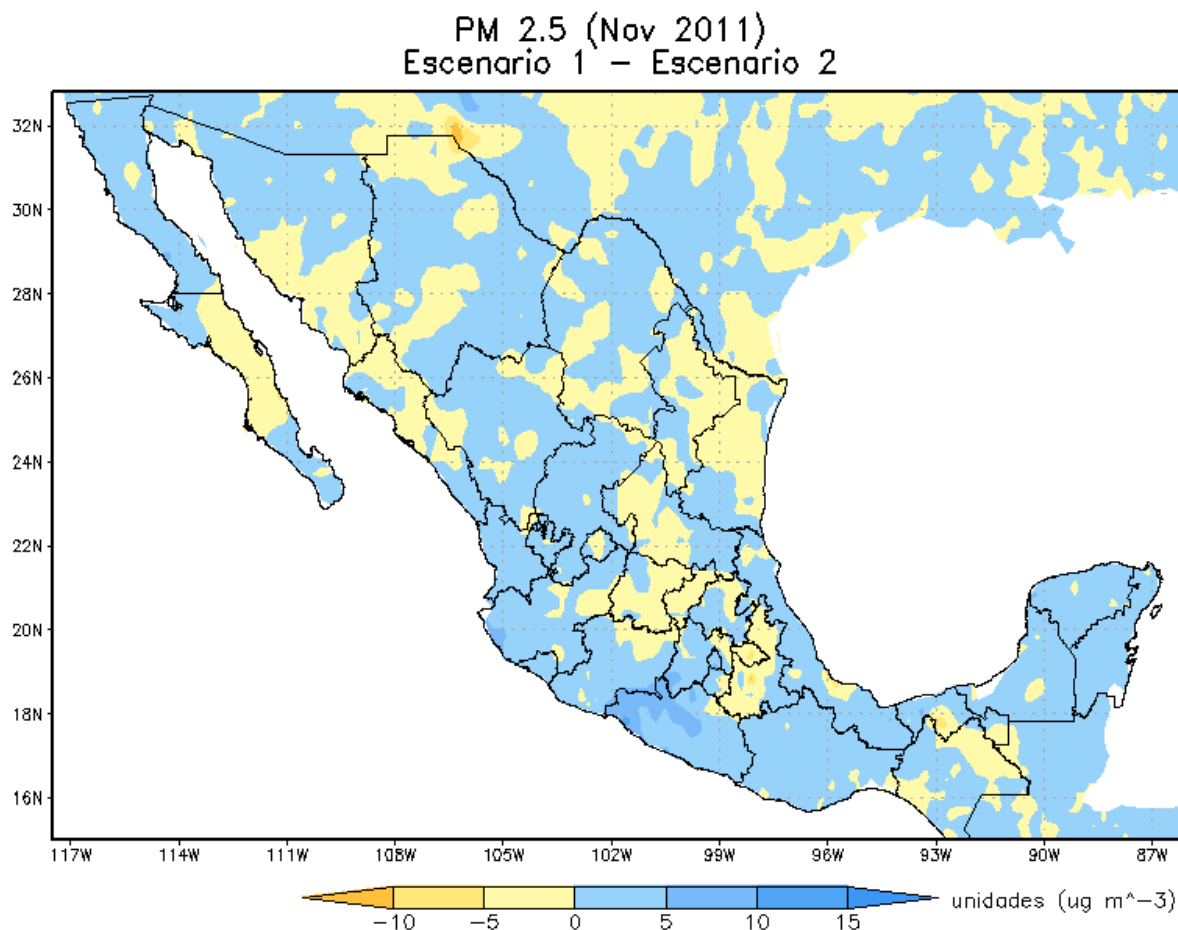
### 5.1.4 Noviembre



**Figura 5.7** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para  $O_3$  en el mes de noviembre.

En la figura 5.7 se observa que en las zonas de la península de Baja California, la península de Yucatán, los estados al sur del país y los estados al oriente del mismo sufren una reducción en la concentración de hasta 2 ppbv aunque también se observan regiones costeras donde la reducción se encuentra entre 4 a 6 ppbv. En contraste, la zona norte del país experimenta, en general, un aumento en la concentración de 2 ppbv con regiones de hasta 4 ppbv.



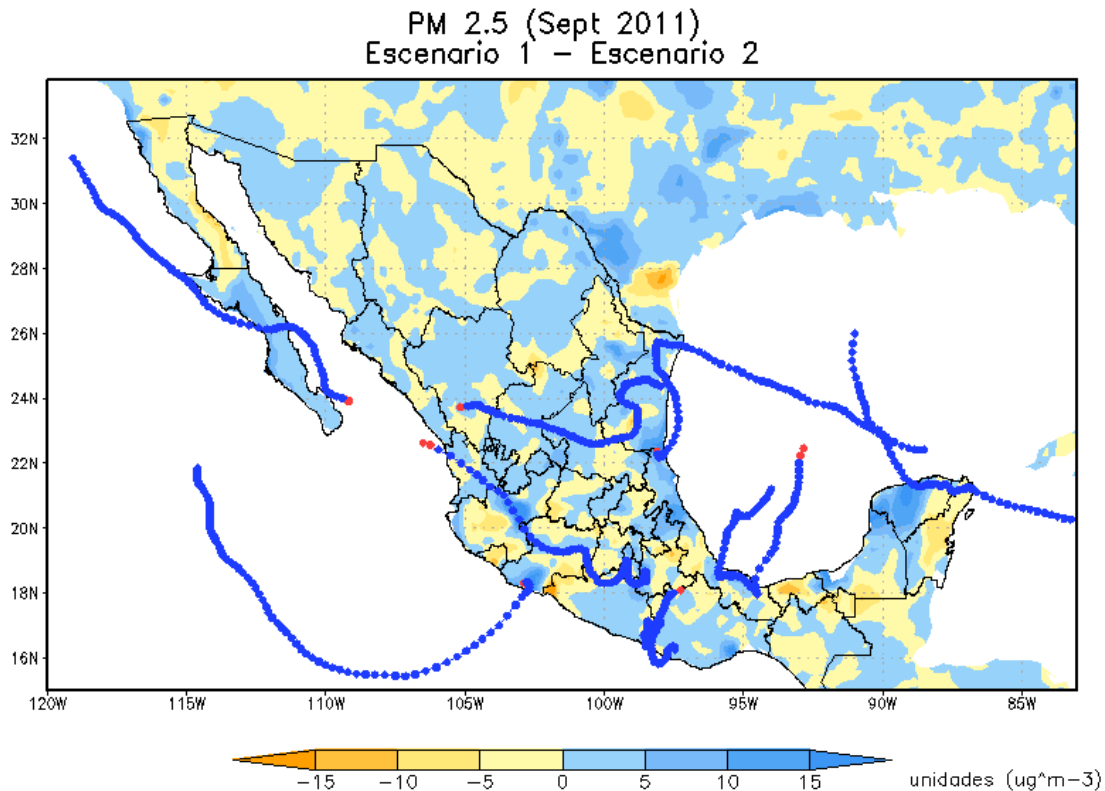


**Figura 5.8** Diferencia de los máximos de concentración entre escenarios para  $\text{PM}_{2.5}$  para el mes de noviembre.

En la figura 5.8 se muestra que la concentración de ozono disminuiría hasta  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la península de Yucatán, en los estados del sur y occidente del país y asimismo en el estado de Baja California Norte. Incluso se observan regiones en las costas de Guerrero y Jalisco donde la reducción en ozono es de hasta  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la zona centro y norte del territorio mexicano se produce un aumento en la concentración de hasta  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Es necesario, como ya se ha mencionado antes, hacer un análisis más detallado de las características químicas y condiciones meteorológicas de la atmósfera en diferentes regiones de país con el objetivo de comprender por qué pueden darse estas condiciones.

## 5.2 Trayectorias de parcelas



**Figura 5.9** Trayectorias de parcelas de aire durante el periodo correspondiente a septiembre.

En la figura 5.9 se muestran trayectorias a nivel de superficie de diferentes parcelas de aire durante el periodo de septiembre elegido. Las trayectorias son hacia atrás e inician donde los puntos rojos se encuentran localizados. Se observa entonces que parcelas que provienen del mar, y que por lo tanto interaccionan con las emisiones de los buques (Figura 3.1), impactan el estado de Baja California Sur, Michoacán, Veracruz, Tamaulipas y la península de Yucatán, por lo que las emisiones de los buques sí afectan, en principio, las zonas costeras del país en este periodo.

En el anexo 9.10 se encuentran trayectorias de parcelas de aire para los otros periodos tanto para ozono como  $\text{PM}_{2.5}$  con el objetivo de dar sustentación a lo mostrado en las figuras 5.1 a 5.8.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se analizan los estadísticos calculados para cada variable, periodo y base de datos (Tabla 6.1) además de una descripción de las mismas para la toma de decisiones (Tabla 6.2).

Por otra parte, también se muestra la diferencia en porcentaje entre los escenarios (Tabla 6.4) y una serie de gráficas de caja y bigotes con el fin de comparar las observaciones con los datos de las variables químicas del modelo. En cuanto a las variables meteorológicas también se muestran una serie de gráficas (histogramas, diagramas de dispersión y gráficos cuantil-cuantil) para complementar los resúmenes de estadísticos de las bases de datos de GDAS y SEMAR.

**Tabla 6.1** Descripción de variables estadísticas

Variable	Descripción
FBAR	Promedio de los pronósticos
FSTDEV	Desviación estándar de los pronósticos
OBAR	Promedio de las observaciones
OSTDEV	Desviación estándar de las observaciones
PR_CORR	Coefficiente de correlacion de Pearson
RMSE	Raíz del error cuadrático medio

**Tabla 6.2** Interpretación de las variables estadísticas

Variable	Descripción
RMSE	Un valor pequeño de este estadístico significa que los valores del pronóstico son muy parecidos a los valores de las observaciones. En un caso ideal donde los pronósticos coincidan con las observaciones esta variable adquiere un valor de cero.
PR_CORR	El valor del coeficiente de Pearson oscila entre -1 y 1 y nos indica el grado de relación lineal entre dos variables.  PR_CORR = 1, existe una correlación positiva perfecta PR_CORR= -1, existe una correlación negativa perfecta PR_CORR= 0, no existe relación lineal
FSTDEV y OSTDEV	Una buena modelación es aquella en la cual las desviaciones estándar de las observaciones y los pronósticos adquieren valores similares.

## 6.1 Comparación con mediciones de la RAMA

En la tabla 6.3 se resumen los estadísticos calculados para las variables químicas (ozono y PM<sub>2.5</sub>) para cada periodo con los datos de observaciones de la RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico).

**Tabla 6.3** Estadísticos para la base de datos de la RAMA

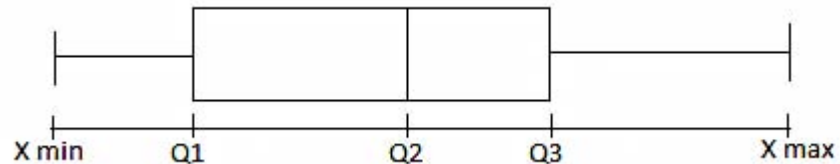
	Febrero (09-16)	Mayo (15-22)	Ago 30 - Sep 06	Noviembre (20-27)
Ozono				
FBAR	68.05	87.60	54.97	65.67
FSTDEV	9.78	15.35	14.09	12.98
OBAR	70.72	99.91	56.14	62.39
OSTDEV	12.26	12.01	20.38	20.74
PR_CORR	0.25	0.26	-0.12	-0.62
RMSE	13.01	20.02	24.42	28.78
PM 2.5				
FBAR	36.65	22.32	16.75	36.33
FSTDEV	15.94	11.87	7.90	12.12
OBAR	27.03	34.27	16.06	23.72
OSTDEV	4.79	3.89	6.16	5.52
PR_CORR	0.54	-0.17	-0.19	0.59
RMSE	16.22	17.12	10.21	15.66

En cuanto al ozono, se observa que en los periodos de febrero y mayo es donde existe una mayor correlación positiva de los datos de observaciones y pronósticos y se obtuvieron valores de RMSE que van desde 13.01 hasta 28.78. Por último las desviaciones estándar de los pronósticos y las observaciones difieren en menor medida en el mes de febrero y en mayor medida en el mes de noviembre.

En cuanto a PM<sub>2.5</sub> se destaca que en los periodos que corresponden a febrero y noviembre existe la mayor correlación positiva entre las variables. Asimismo se obtuvieron valores de RMSE que fluctúan entre 10.21 y 16.22, mientras que las desviaciones estándar de los pronósticos y las observaciones no tienen valores semejantes. En cambio, en el periodo que corresponde a agosto-septiembre se observa que la correlación de los datos es baja, no obstante, las desviaciones estándar son similares y se tiene el RMSE el más bajo.

## 6.2 Comparaciones entre los valores de pronóstico del modelo y las observaciones en el área metropolitana para el Escenario 1

Para la base de datos de observaciones, RAMA, se hizo uso de diagramas de caja y bigotes, los cuales proporcionan información útil en cada una de sus regiones:



(X min - Q1): Es la región donde se encuentran los valores de mediciones más pequeños.

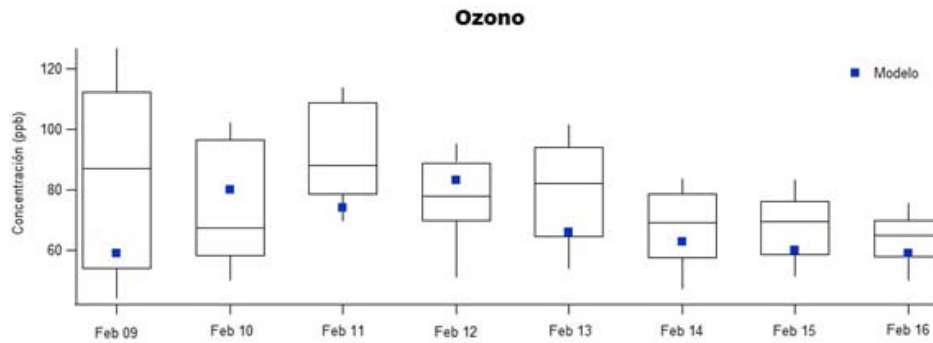
(Q1- Q3): Corresponde a la región donde se encuentran el 50 % de los datos medidos.

(Q2): Es la mediana del conjunto de datos

(Q3 – X max): Es la región donde se encuentran los valores más grandes de mediciones.

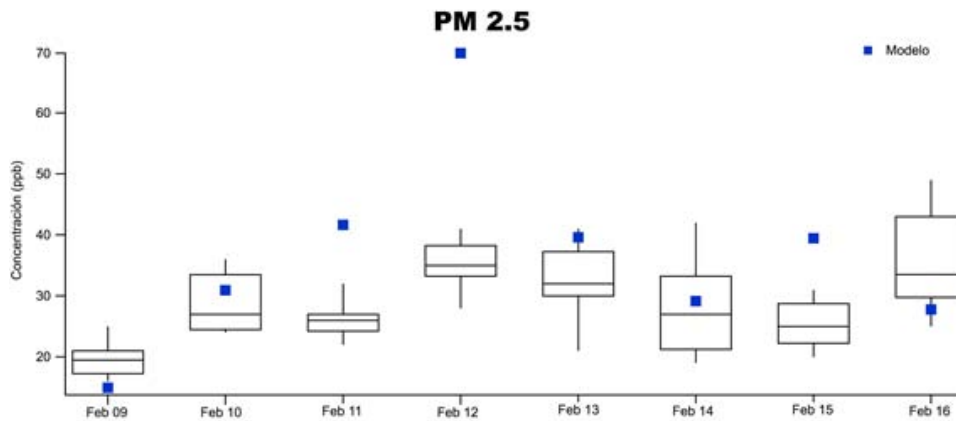
En las figuras 6.1-6.8 se muestran los diagramas de caja y bigotes para cada uno de los periodos señalados y que representan las estaciones de monitoreo atmosférico en el centro del país mientras el punto de color azul representa el valor obtenido por el modelo (promedio de 24 horas para  $PM_{2.5}$  y el máximo de ozono cada 24h)

## 6.2.1 Febrero



**Figura 6.1** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de febrero.

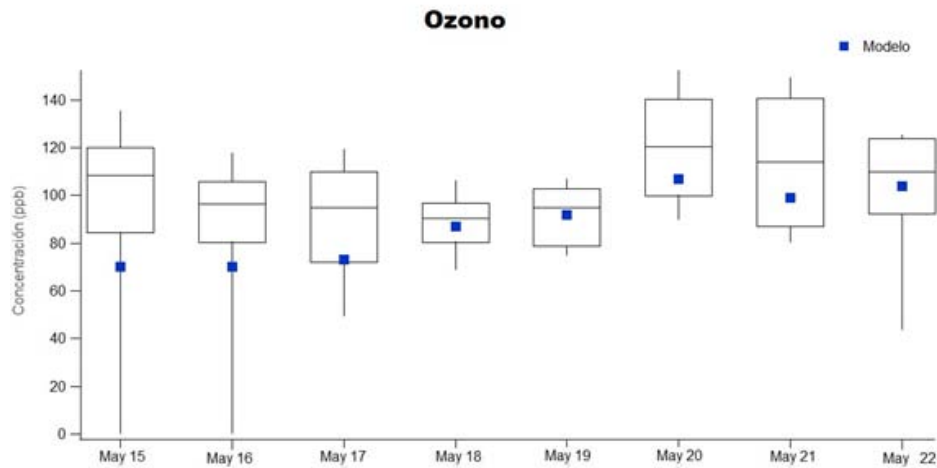
En la figura 6.1 se observa que para el ozono en el mes de febrero los valores arrojados por el modelo se localizan en su gran mayoría dentro de la zona donde se encuentran el 50% de los datos.



**Figura 6.2** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de PM<sub>2.5</sub> de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de febrero.

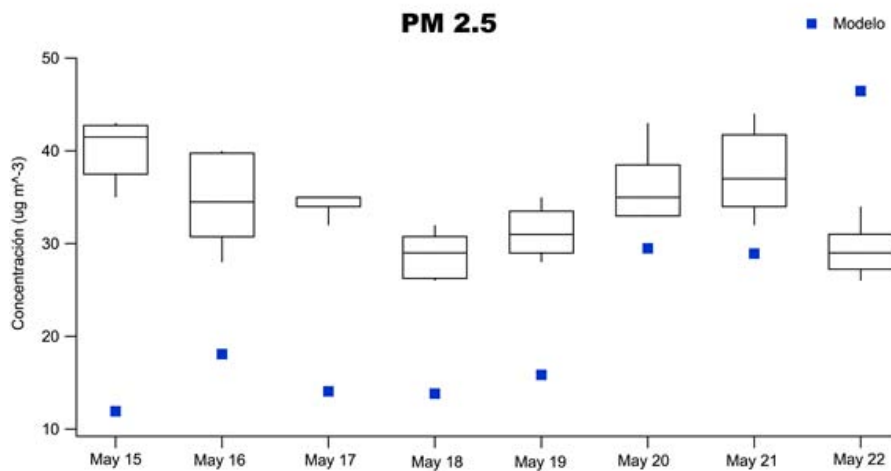
En este caso se observa que los resultados del modelo fluctúan, por lo que en algunos casos se encuentran dentro de la caja, en otros en los bigotes y en algunos más fuera de los diagramas. (Figura 6.2)

## 6.2.2 Mayo



**Figura 6.3** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de mayo.

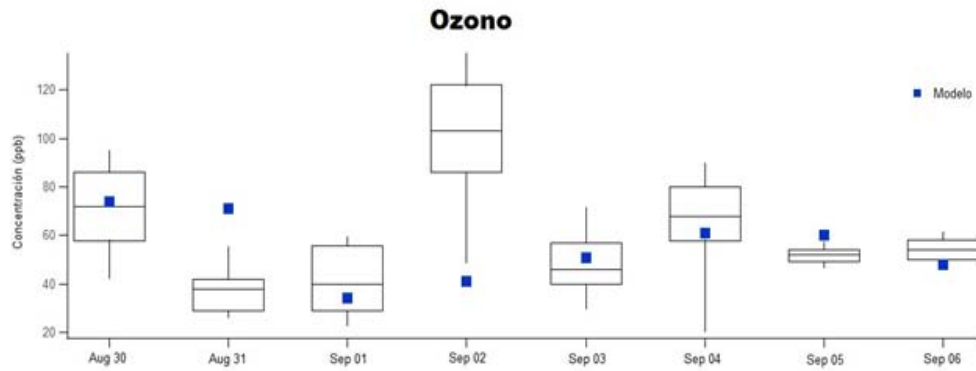
En la figura 6.3 se observa que los datos obtenidos por el modelo caen en su mayoría dentro de las cajas y en pocos casos en los bigotes. También se percibe que el modelo no arroja valores extremos.



**Figura 6.4** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de  $\text{PM}_{2.5}$  de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de mayo.

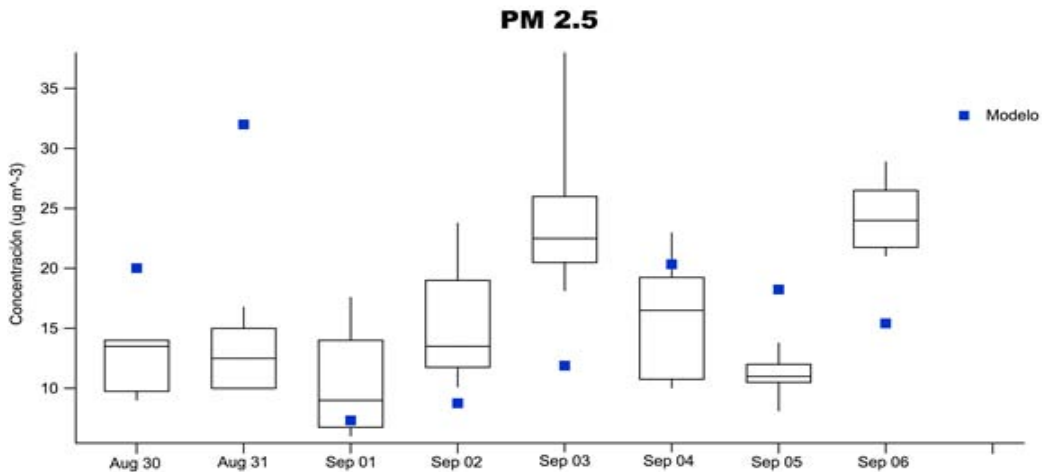
Para la figura 6.4 se observa que el modelo no estima los datos de las estaciones, los cuales se encuentran fuera de los diagramas de caja y bigotes.

### 6.2.3 Septiembre



**Figura 6.5** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de septiembre.

En la figura 6.5, se percibe que el modelo en algunos casos predice valores dentro de las cajas, en otros los subestima y en algunos otros los sobrestima.

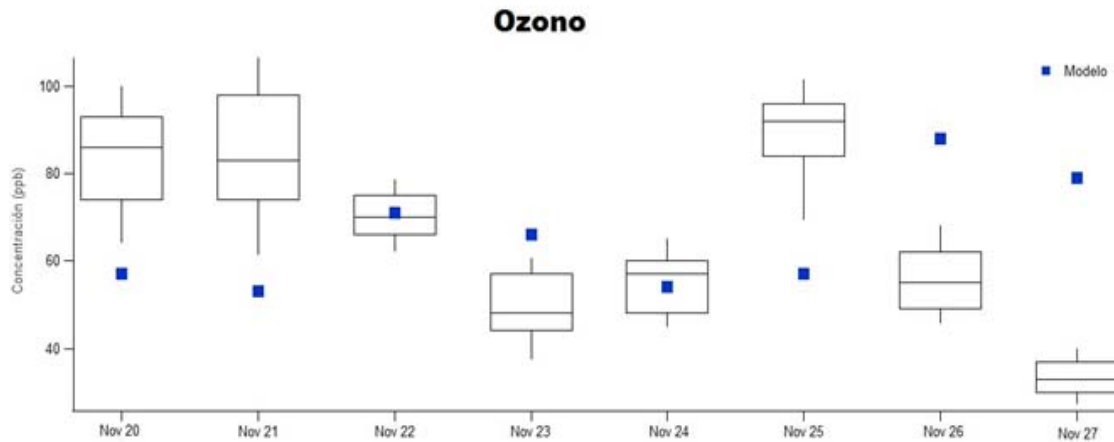


**Figura 6.6** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de PM<sub>2.5</sub> de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de septiembre.

Se observa en la Figura 6.6 que los valores predcidos por el modelo oscilan de forma que en algunos días se encuentran dentro del diagrama de caja y bigotes, otros días sobrestima los valores de las estaciones y en otros más los subestima.

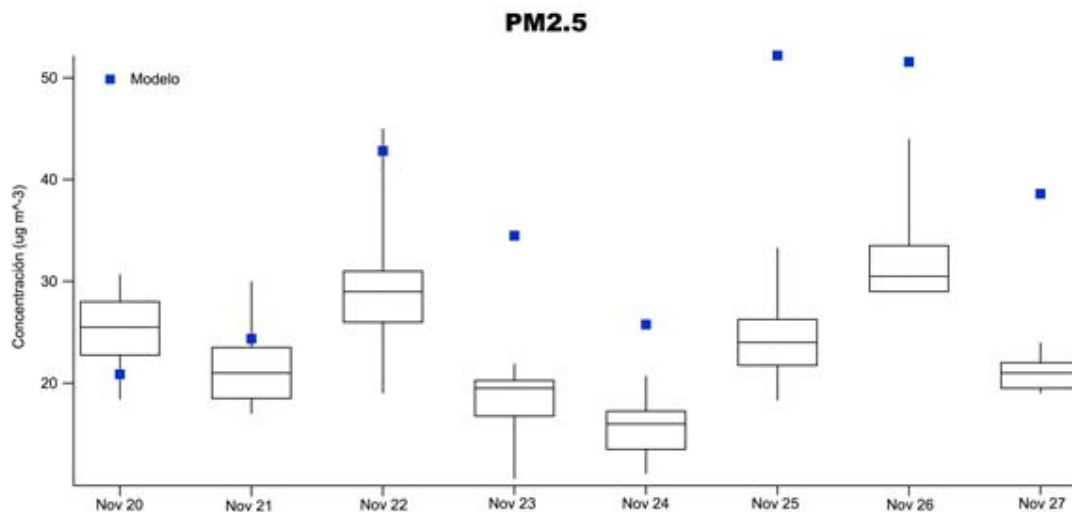


## 6.2.4 Noviembre



**Figura 6.7** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de ozono de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de noviembre.

En la figura 6.7 se observa que los valores obtenidos por el modelo fluctúan de modo que en algunos casos se encuentran dentro de los diagramas de caja y bigote y en otros por arriba o abajo de los mismos.



**Figura 6.8** Diagrama de caja y bigote para las observaciones de PM<sub>2.5</sub> de la RAMA y los puntos de pronóstico del modelo para el mes de noviembre.

Para este caso (figura 6.8) se observa que el modelo tiende a sobrestimar las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> reportadas por las estaciones en la mayoría de los días estudiados.

### 6.3 Comparación de escenarios

En seguida se muestran los porcentajes de cambio de la concentración de ozono y  $PM_{2.5}$  de un escenario a otro para cada uno de los periodos en un punto localizado en la Ciudad de México dado que esta región cuenta con una base de datos confiable de monitoreo atmosférico además que es una de las zonas con mayores problemas de contaminación del aire en el país.

**Tabla 6.4** Diferencia en porcentaje entre escenarios (Escenario 1 – Escenario 2)

Febrero	
Ozono	-0.41%
PM 2.5	0.47%
Mayo	
Ozono	1.02%
PM 2.5	-15.72%
Septiembre	
Ozono	-3.68%
PM 2.5	-16.70%
Noviembre	
Ozono	0.69%
PM 2.5	3.17%

Se obtiene la diferencia entre escenarios: “Escenario 1 – Escenario 2”. Por lo tanto, se deduce que en ocasiones el impacto puede ser positivo, es decir, la calidad del aire mejora si se controlan las emisiones marítimas de las embarcaciones marítimas. Por otra parte, otras veces el impacto es negativo, lo que significa que las concentraciones de ozono o  $PM_{2.5}$  aumentan en la región por lo que se observa que no es sencillo determinar cómo es que las concentraciones de estas especies químicas podrían variar al reducir las emisiones marítimas (Figura 3.2).

## 6.4 Comparación con datos de GDAS (Global Data Assimilation System)

### 6.4.1 Superficie terrestre

En la tabla 6.5 se resumen los estadísticos calculados para la temperatura, la humedad relativa, y las componentes del viento sobre superficie terrestre para cada periodo con los datos de observaciones de GDAS. Pero antes de ver este resumen es necesario mencionar que el desempeño de un modelo se considera alto cuando se cumple que el valor de desviación estándar de las observaciones (OSTDEV) se aproxima al valor de la desviación estándar de los pronósticos (FSTDEV) y que el valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) sea menor que OSTDEV (Pielke, 1984).

**Tabla 6.5** Estadísticos para la base de datos GDAS en superficie terrestre

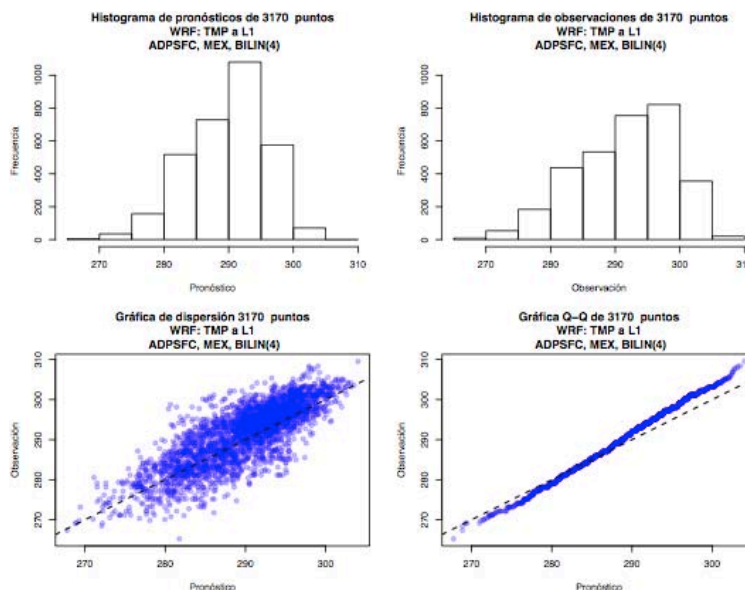
	Febrero (09-16)	Mayo (15-22)	Ago 30 - Sep 06	Noviembre (20-27)
<b>Temperatura</b>				
FBAR	289.62	295.08	295.06	291.68
FSTDEV	6.18	5.05	6.49	5.26
OBAR	291.17	298.07	297.41	293.87
OSTDEV	7.53	6.60	6.38	6.46
PR_CORR	0.81	0.85	0.90	0.84
RMSE	4.65	4.64	3.77	4.15
<b>Humedad relativa</b>				
FBAR	55.68	55.62	75.14	66.86
FSTDEV	25.17	27.31	20.03	20.30
OBAR	57.73	59.75	77.91	68.71
OSTDEV	25.15	26.29	18.70	21.30
PR_CORR	0.72	0.81	0.66	0.67
RMSE	18.87	16.89	16.30	17.06
<b>Componente U del viento</b>				
FBAR	-0.42	0.84	-0.36	-0.52
FSTDEV	3.04	3.66	3.31	2.68
OBAR	-0.03	0.03	-0.46	-0.50
OSTDEV	2.35	3.01	2.13	2.77
PR_CORR	0.50	0.59	0.38	0.24
RMSE	2.80	3.18	3.19	3.35
<b>Componente V del viento</b>				
FBAR	-1.13	0.65	0.23	-0.71
FSTDEV	3.37	2.64	3.27	2.94
OBAR	-0.59	0.57	0.08	0.05
OSTDEV	3.42	2.78	2.23	3.56
PR_CORR	0.62	0.44	0.36	0.33
RMSE	3.02	2.87	3.23	3.88

Dicho esto, se observa en la tabla 6.5 que el modelo tiene un alto desempeño para la temperatura y humedad relativa en los cuatro periodos, en cambio, para las componentes del viento no siempre es así, salvo el caso de la componente meridional del viento en el periodo de febrero.

Por otra parte, se observa que existe una correlación positiva entre los pronósticos y las mediciones para la temperatura con coeficientes de Pearson que oscilan entre 0.81 y 0.90 e igualmente para la humedad relativa donde varían entre 0.66 y 0.81, mientras que para las componentes del viento se obtienen valores por abajo de 0.63 de este coeficiente.

En seguida se muestran histogramas, diagramas de dispersión y gráficos cuantil-cuantil para cada variable meteorológica en el periodo correspondiente al mes de febrero con el objetivo de complementar lo mostrado en la Tabla 6.5. Las gráficas para los periodos de mayo, septiembre y noviembre se muestran en el Anexo 9.6.

## Temperatura

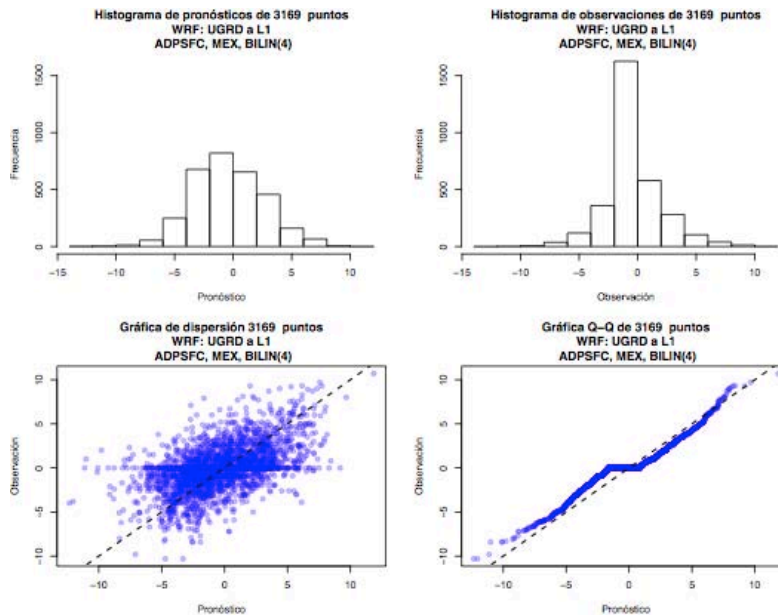


**Figura 6.9** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en febrero.

En los histogramas de las observaciones y los pronósticos se observa que el modelo sobrestima las frecuencias que se encuentran por arriba de los 280 K, no obstante representa el sesgo de los datos. En el diagrama de dispersión se muestra que existe una correlación fuerte entre los datos de pronóstico y de observaciones lo cual se ve reflejado en el valor del coeficiente de Pearson de 0.81 mostrado en la Tabla 6.5.

En el diagrama cuantil-cuantil también se distingue que los puntos dibujados se sitúan aproximadamente sobre la recta, con lo cual se interpreta que existe una buena aproximación de la distribución de los datos de pronóstico con la distribución de los datos de observaciones.

### Componente U del viento

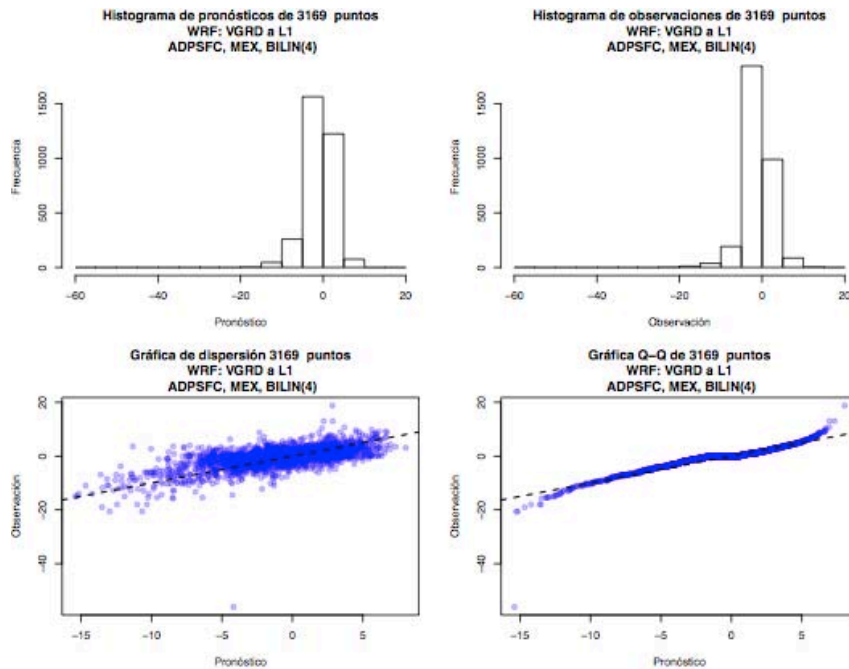


**Figura 6.10** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero.

En el caso de la componente zonal del viento (u) se observa en los histogramas que el modelo subestima las frecuencias de las observaciones menores y cercanas a cero y asimismo las sobrestima para valores mayores que cero. En el diagrama de dispersión se observa que la correlación de los datos es débil (Ver Tabla 6.5) al estar los puntos muy separados de la recta y además se muestra que hay un problema con las mediciones en el punto cero, lo cual puede deberse a problemas de los sensores al realizar las mediciones.

En el gráfico cuantil-cuantil se observa que la distribución de los datos del modelo se aproxima a la distribución de los datos de las observaciones debido a que los puntos dibujados están muy cercanos a la recta, sin embargo, también se muestra que existe un inconveniente con datos de observaciones cercanos a cero.

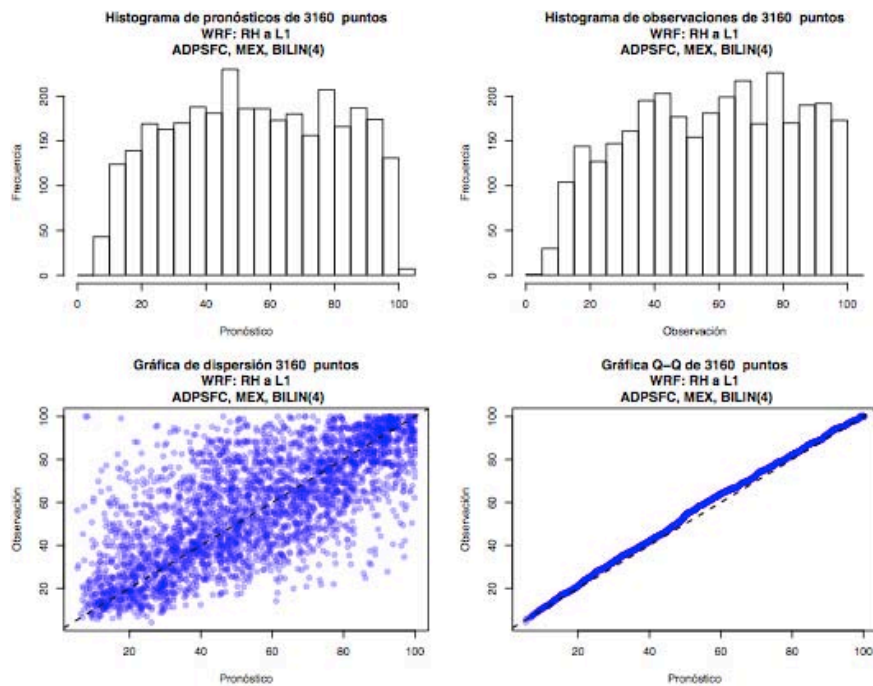
## Componente V del viento



**Figura 6.11** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero.

En el caso de la componente meridional del viento ( $v$ ) se observa en los histogramas que el modelo subestima las frecuencias de las observaciones menores y cercanas a cero y asimismo sobrestima las frecuencias mayores a este valor. En el diagrama de dispersión se observa que los datos se agrupan en su mayoría sobre la recta, lo cual nos indica que existe una correlación positiva entre los datos y que se traduce en un valor del coeficiente de Pearson de 0.62 (Tabla 6.5). En el gráfico cuantil-cuantil se observa que los puntos dibujados se encuentran muy cercanos a la recta, en consecuencia, la distribución de los datos del modelo constituye una buena aproximación de los datos de observaciones.

## Humedad relativa



**Figura 6.12** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en febrero.

En cuanto a la humedad relativa (Figura 6.12), se observa que el modelo tiende a sobrestimar las frecuencias de los valores por debajo de 40% de esta variable mientras que tiende a subestimar las frecuencias de los valores por arriba de 80%. En el diagrama de dispersión se observa que una gran cantidad de puntos dibujados están muy cerca de la recta lo que significa que las variables se correlacionan de forma positiva aun cuando existen puntos alejados de la misma. Esto se comprueba al observar el valor de 0.72 del coeficiente de Pearson mostrado en la Tabla 6.5.

Por otro lado, en el gráfico cuantil-cuantil se distingue que los puntos están sobre la bisectriz por lo que significa que la distribución de los datos del modelo se aproxima a la distribución de los datos de mediciones.

### 6.4.2 Superficie marina en el Golfo de México

Ahora bien, la tabla 6.6 muestra los valores de los estadísticos calculados para las variables meteorológicas sobre la superficie marina del Golfo de México.

**Tabla 6.6** Estadísticos para la base de datos GDAS en el Golfo de México

	February (09-16)	May (15-22)	Aug 30 - Sep 06	November (20-27)
Temperatura				
FBAR	289.59	297.16	302.31	296.23
FSTDEV	3.10	1.79	1.04	1.47
OBAR	287.98	297.01	301.78	296.36
OSTDEV	4.28	2.67	1.89	2.57
PR_CORR	0.90	0.80	0.41	0.80
RMSE	2.58	1.63	1.82	1.64
Humedad relativa				
FBAR	74.90	76.05	80.93	82.90
FSTDEV	11.94	11.19	7.58	7.69
OBAR	69.29	71.53	77.34	78.61
OSTDEV	15.51	15.55	10.69	10.93
PR_CORR	0.77	0.74	0.38	0.66
RMSE	11.39	11.32	11.07	9.27
Componente U del viento				
FBAR	-1.29	-1.64	-2.73	-3.56
FSTDEV	3.33	3.68	6.59	3.39
OBAR	-1.57	-2.30	-2.73	-3.50
OSTDEV	3.85	4.42	6.11	3.44
PR_CORR	0.70	0.85	0.66	0.78
RMSE	2.86	2.43	5.23	2.25
Componente V del viento				
FBAR	-2.23	1.04	3.63	1.84
FSTDEV	5.20	5.03	8.70	4.81
OBAR	-1.98	0.88	2.43	1.54
OSTDEV	5.71	5.31	6.25	5.00
PR_CORR	0.77	0.78	0.61	0.81
RMSE	3.70	3.42	7.04	3.04

Se observa que para la mayoría de los casos se cumple que  $OSTDEV \approx FSTDEV$  y además que  $RMSE < OSTDEV$  en los cuatro periodos (Pielke, 1984), excepto en el periodo correspondiente a septiembre para la humedad relativa y la componente meridional del viento. Por lo tanto, desempeño del modelo es alto al reproducir los valores de mediciones de las variables meteorológicas para la base de datos de GDAS en la superficie marina del Golfo de México

También se observa que para la temperatura se obtienen altos valores del coeficiente de Pearson por arriba de 0.80, excepto para el periodo correspondiente a septiembre.

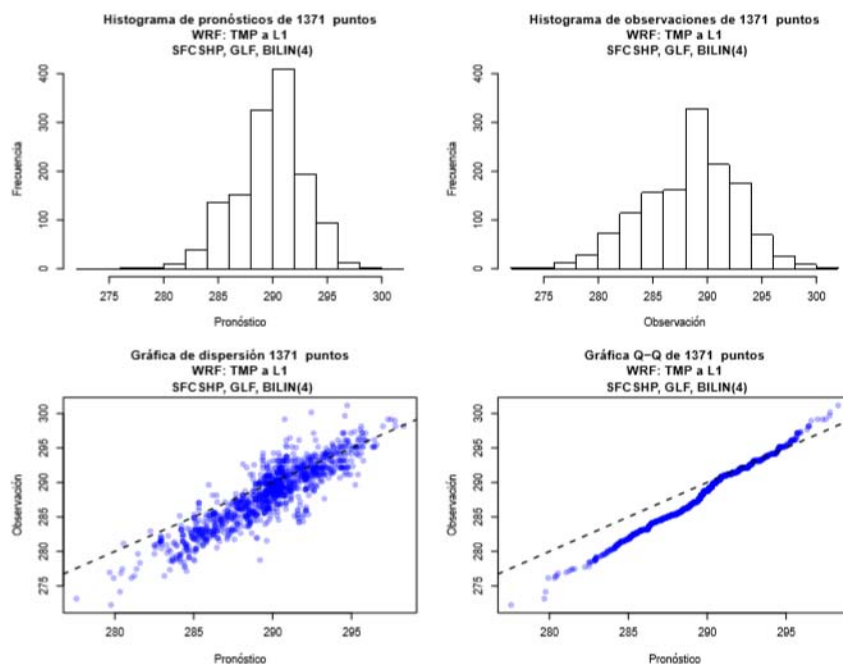


En cuanto a la humedad relativa se muestra que los valores de correlación oscilan entre 0.38 y 0.77, donde el valor más bajo se obtiene en el mes de septiembre.

Para la componente zonal del viento el valor del coeficiente de Pearson varía entre 0.66 y 0.85 mientras que para la componente zonal lo hace de 0.61 a 0.81. Para ambas componente se observa que la correlación más fuerte entre los datos se obtiene en los periodos correspondientes a mayo y noviembre.

Ahora se muestran los histogramas, diagramas de dispersión y gráficos cuantil-cuantil para la temperatura, humedad relativa y las componentes del viento en el periodo correspondiente a febrero con el objetivo de complementar la Tabla 6.6. Las gráficas para los otros periodos del año se muestran en el Anexo 9.7.

### Temperatura



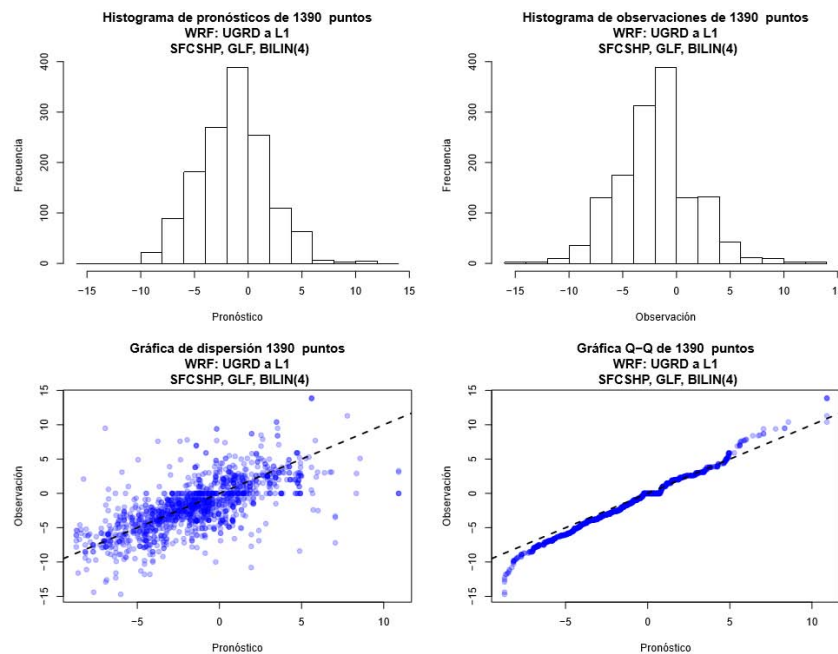
**Figura 6.13** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en febrero.

En cuanto a los histogramas se observa que el modelo tiende a sobrestimar las frecuencias de los valores menores a 292 K, por lo que no puede reproducir todos los valores más chicos en este periodo. En el diagrama de dispersión se observa que la mayoría de los datos se agrupan cerca de la recta, indicando correlación positiva entre

los datos de pronóstico y observaciones la cual tiene un valor de 0.90 de acuerdo al coeficiente de Pearson mostrado en la Tabla 6.6.

En el gráfico cuantil-cuantil se observa que la distribución de los datos del modelo no se aproxima a la distribución de los datos de mediciones ya que, existen discrepancias con los datos menores a 285 K y mayores a 295 K.

### Componente U del viento

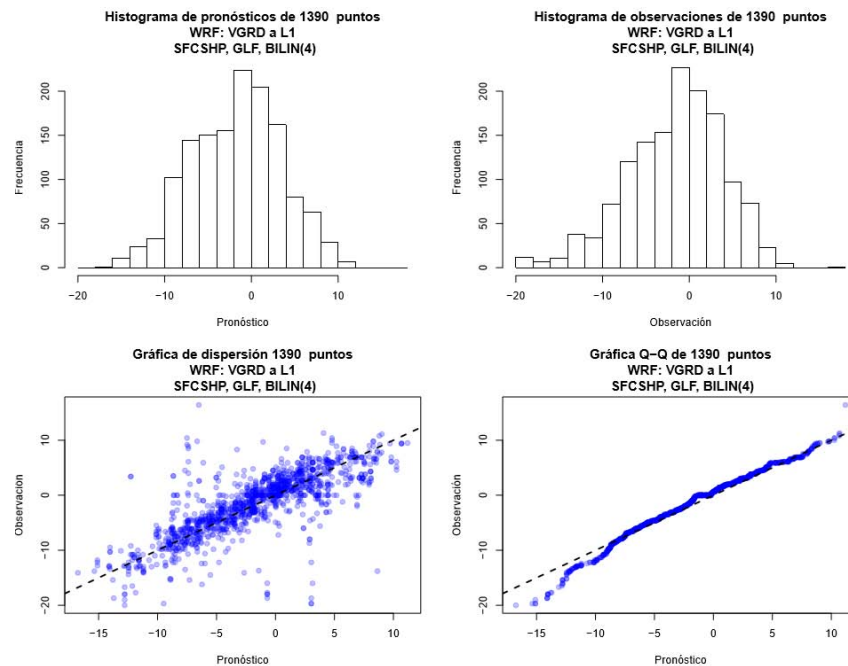


**Figura 6.14** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero.

Para la componente zonal del viento se muestra que el modelo tiende a sobrestimar algunas frecuencias menores que -4 m/s y sobrestima algunas frecuencias mayores que 0 m/s. En el diagrama de dispersión se observa que una gran cantidad de puntos se agrupa cerca de la recta, otros puntos extremos están dispersos y por último se ve un conjunto de puntos con valor cero en el eje de las observaciones cuando el modelo predice valores menores o mayores que éste. La causa de esto puede deberse a que los sensores que miden la velocidad del viento no fueron capaces de medir los vientos cuya velocidad es muy cercana a cero, o bien que el modelo no reprodujo estos valores.

En el gráfico cuantil-cuantil se nota que existen discrepancias con los valores extremos mayores a 5 m/s y menores a -7 m/s, no obstante, los puntos centrales presentan una tendencia lineal lo que se traduce en que la distribuciones de los datos del modelo se asemeja a la distribución de las observaciones.

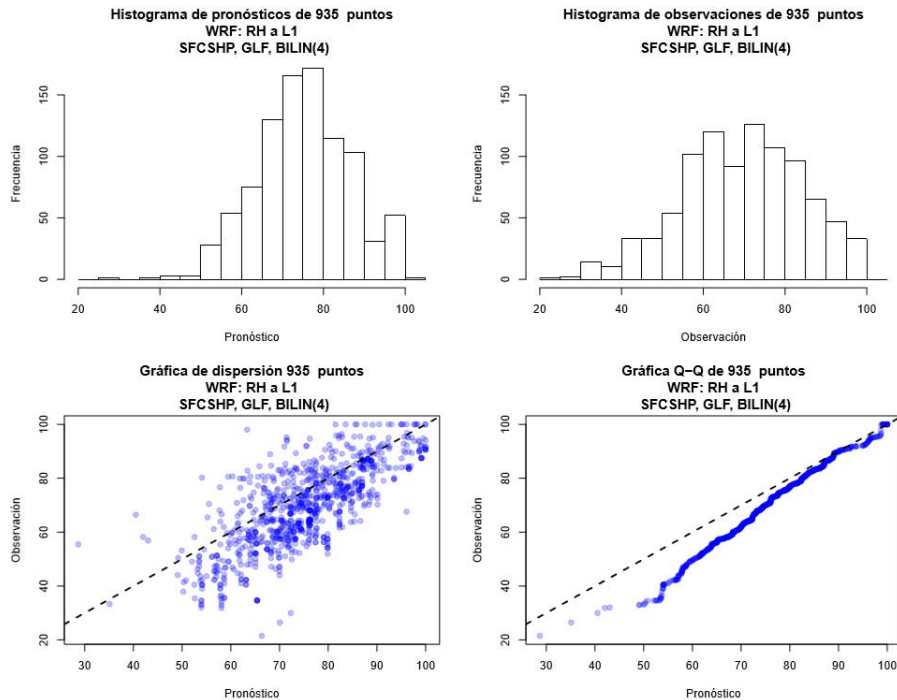
### Componente V del viento



**Figura 6.15** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero.

En lo que respecta a los histogramas se observa que el modelo representa el sesgo de los datos aunque sobrestima las frecuencias entre los valores de -10 m/s y 4 m/s y no reproduce los valores más pequeños. Por otra parte, en el diagrama de dispersión muestra que la gran mayoría de los puntos se encuentran muy cercanos a la recta indicando una correlación fuerte lo cual está apoyado por el valor del coeficiente de Pearson de 0.77 mostrado en la Tabla 6.6. Por otra parte, en el gráfico cuantil-cuantil se observa que la distribución de los datos de pronóstico se aproxima a la distribución de los datos de observaciones con algunas diferencias en los datos menores a -10 m/s.

## Humedad relativa



**Figura 6.16** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en febrero.

En cuanto a la humedad relativa se observa que el modelo sobrestima las frecuencias de los valores menores que 90% de humedad relativa. En el diagrama de dispersión se observa que una cantidad de datos se encuentra alejados de la recta pero siguiendo una tendencia indicando una correlación positiva entre las variables la cual es de 0.77 de acuerdo con el coeficiente de Pearson calculado mostrado en la Tabla 6.6.

Por otra parte en el gráfico cuantil-cuantil se observa que entre las distribuciones de las observaciones y los pronósticos no se aproximan, es decir, no son semejantes debido a que los puntos en su mayoría no caen sobre la recta.

### 6.4.3 Superficie marina en el Océano Pacífico

Ahora bien, la tabla 6.7 muestra los valores de los estadísticos calculados para las variables meteorológicas sobre la superficie marina en el Océano Pacífico.

**Tabla 6.7** Estadísticos para la base de datos GDAS en la superficie marina en el Océano Pacífico.

	February (09-16)	May (15-22)	Aug 30 - Sep 06	November (20-27)
<b>Temperatura</b>				
FBAR	291.42	294.46	296.79	294.80
FSTDEV	3.95	5.73	4.71	4.55
OBAR	291.54	294.95	296.85	294.82
OSTDEV	4.14	5.75	4.05	4.21
PR_CORR	0.90	0.94	0.91	0.94
RMSE	1.80	2.11	1.95	1.55
<b>Humedad relativa</b>				
FBAR	78.23	80.50	86.06	78.46
FSTDEV	7.76	7.93	7.64	6.07
OBAR	77.21	77.19	80.47	78.63
OSTDEV	10.46	10.18	10.37	11.61
PR_CORR	0.25	0.28	0.01	0.22
RMSE	11.38	11.47	13.95	11.83
<b>Componente U del viento</b>				
FBAR	-1.13	3.14	2.69	-1.33
FSTDEV	3.33	2.72	3.77	4.29
OBAR	-0.50	3.92	2.89	-0.26
OSTDEV	4.16	3.48	3.98	4.71
PR_CORR	0.73	0.63	0.48	0.73
RMSE	2.90	2.86	3.95	3.48
<b>Componente V del viento</b>				
FBAR	-2.39	-2.82	-2.15	-2.92
FSTDEV	3.24	3.58	4.67	3.55
OBAR	-2.64	-3.19	-2.46	-3.62
OSTDEV	4.63	4.45	5.48	4.74
PR_CORR	0.76	0.71	0.64	0.75
RMSE	3.04	3.18	4.36	3.21

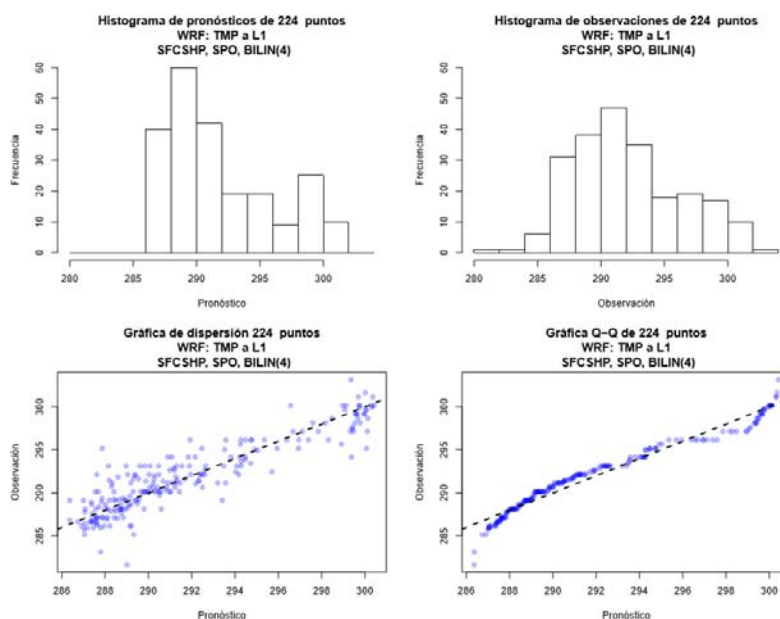
Se observa que existen correlaciones altas para la temperatura que van desde 0.90 hasta 0.91. Para las componentes del viento, las correlaciones oscilan entre 0.48 y 0.73 en el caso de la componente zonal y entre 0.64 y 0.76 para la componente meridional. En el caso de la humedad relativa se observa que la correlación de los datos es débil con valores que van desde 0.01 hasta 0.28 por lo que el modelo no reproduce las observaciones de humedad relativa en los cuatro periodos.

Se observa que para la temperatura y las componentes del viento se cumple que  $OSTDEV \approx FSTDEV$  y también que  $RMSE < OSTDEV$  en los cuatro periodos (Pielke, 1984), excepto para la humedad relativa, por lo que el desempeño del modelo es alto al reproducir los valores de mediciones de temperatura y las componentes meridional y

zonal viento de los datos de observaciones de GDAS para la superficie marina en el Océano Pacífico mexicano.

En seguida se muestran los histogramas, diagramas de dispersión y gráficos cuantil-cuantil para la temperatura, humedad relativa y las componentes del viento en el periodo correspondiente a febrero con el objetivo de complementar la Tabla 6.7. Las gráficas para los periodos correspondientes en los meses mayo, septiembre y noviembre se muestran en el Anexo 9.8.

## Temperatura

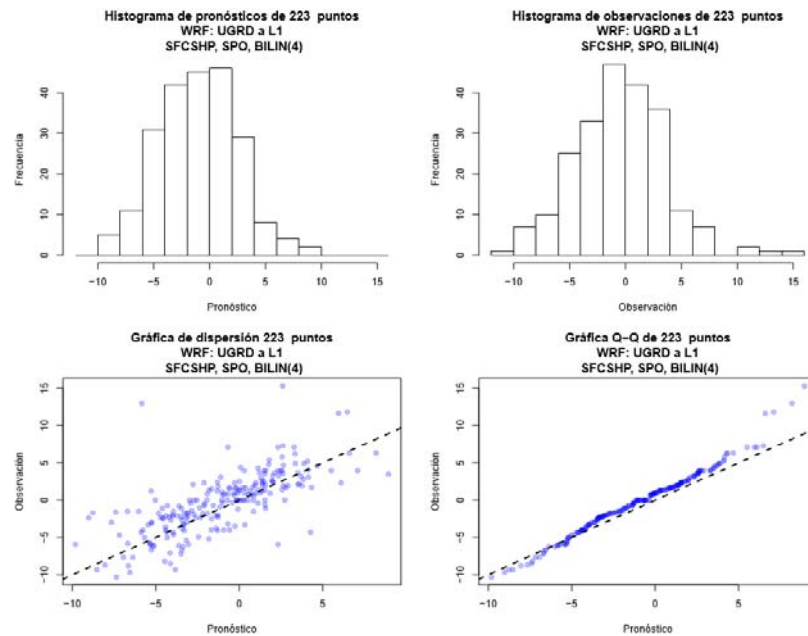


**Figura 6.17** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la temperatura en febrero.

En los histogramas se puede ver que el modelo no predice las frecuencias de los valores menores a 286 K y sobrestima las frecuencias entre 286 K y 290 K. En el diagrama de dispersión se observa que los puntos caen sobre la recta indicando que existe una correlación fuerte y positiva entre las variables, la cual tiene un valor de 0.90 de acuerdo con el coeficiente de Pearson (Tabla 6.7). En cuanto al gráfico cuantil-cuantil se observa que la distribución de los datos de pronóstico se aproxima a la

distribución de los datos de observaciones ya que los puntos dibujados se agrupan cerca de la recta.

### Componente U del viento



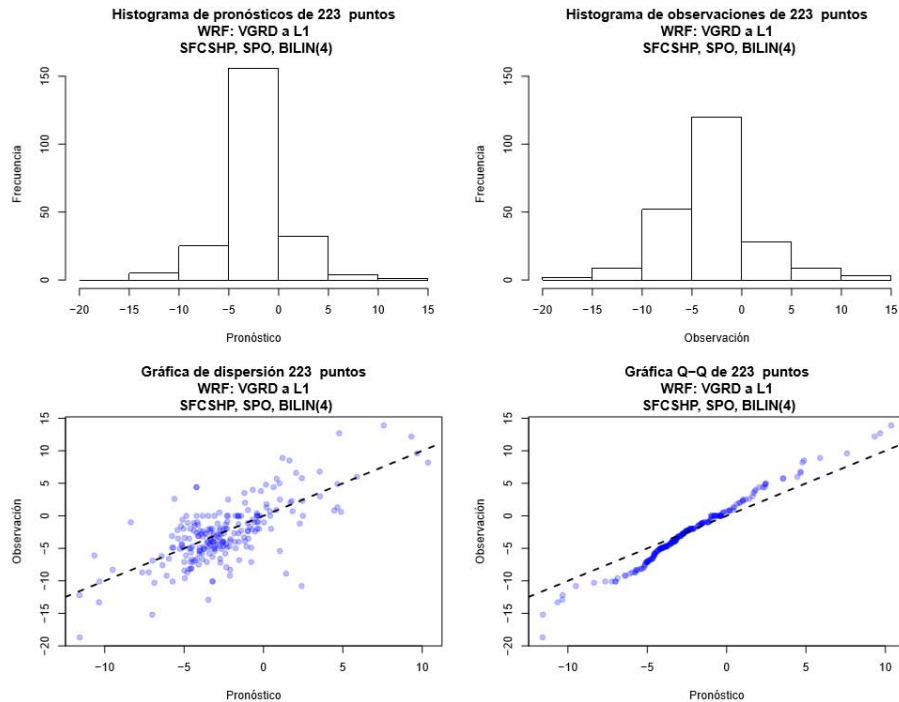
**Figura 6.18** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para componente zonal del viento en febrero.

Por lo que respecta a la componente zonal del viento, se observa que el modelo presenta una tendencia a sobrestimar las frecuencias de los valores menores a cero y a subestimar las frecuencias mayores a este valor. También se observa que el modelo reproduce el sesgo de los datos de mediciones.

En el diagrama de dispersión se observa que los puntos se localizan sobre la recta o cerca de ella, lo cual indica que existe correlación entre los datos de pronóstico y el modelo. Esta correlación tiene un valor de 0.73 de acuerdo el coeficiente de Pearson mostrado en la Tabla 6.7.

Por otra parte en el gráfico cuantil-cuantil se observa que la distribución del modelo se aproxima a la distribución de las observaciones, sin embargo, existen diferencias en los valores mayores que 5 m/s.

## Componente V del viento



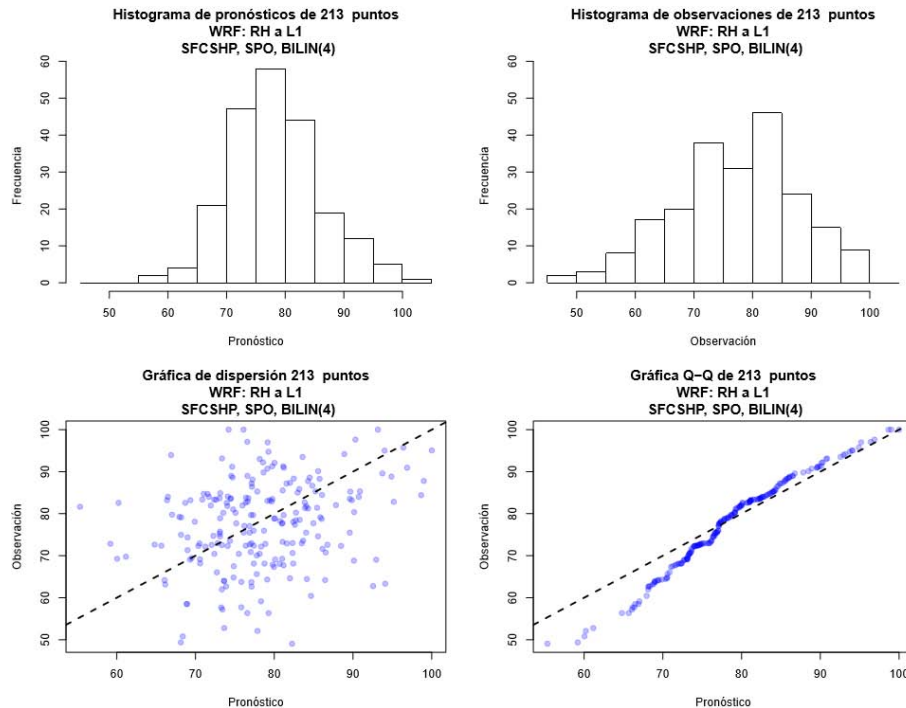
**Figura 6.19** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero

Para la componente meridional del viento se observa en los histogramas que el modelo sobrestima las frecuencias entre los valores de -5 m/s y 5 m/s. Asimismo subestima las otras frecuencias. Por otra parte, en el diagrama de dispersión se muestra que una gran cantidad de puntos dibujados se encuentra cerca de la recta, por lo cual puede inferirse que existe una correlación positiva entre las variables, la cual tiene un valor de 0.76 de acuerdo al coeficiente de Pearson mostrado en la Tabla 6.7.

En cuanto al diagrama cuantil-cuantil se observa que las distribuciones de las observaciones y los pronósticos difieren sobre todo en los valores extremos.



## Humedad relativa



**Figura 6.20** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la humedad relativa en febrero.

En cuanto a la humedad relativa se muestra que el modelo sobrestima las frecuencias de los valores menores a 80% de humedad relativa y no reproduce el sesgo de los datos de observaciones. Ahora bien, en el diagrama de dispersión no se observa una tendencia clara de los puntos, lo cual indica una correlación débil de los datos. Esto viene apoyado en el valor del coeficiente de Pearson de 0.25 mostrado en la Tabla 6.7. Por último en el gráfico cuantil-cuantil se observa que las distribuciones de los datos de mediciones y pronósticos muestran diferencias en los valores menores a 80% de humedad relativa.

En resumen al comparar los valores de las Tablas 6.5-6.7 se observa que el modelo reproduce los datos de temperatura con correlaciones en la mayoría de los casos por arriba de 0.8 tanto para la superficie terrestre, el Golfo de México y el Océano Pacífico. En cuanto a la humedad relativa se obtienen correlaciones por arriba de 0.66 para la

mayoría de los casos en superficie terrestre y el Golfo de México mientras observan correlación bajas para las estaciones del Océano Pacífico.

Para las componentes del viento, el modelo reproduce mejor los datos en el Golfo de México y el Océano Pacífico con valores del coeficiente de correlación de Pearson por arriba de 0.66 mientras que en el interior del país los valores de este estadístico son menores que 0.62.

## 6.5 Comparación con mediciones de la SEMAR

En la tabla 6.8 se resumen los estadísticos calculados para la temperatura, la humedad relativa, y las componentes del viento para cada periodo con los datos de observaciones de SEMAR (Secretaría de Marina).

**Tabla 6.8** Estadísticos para la base de datos SEMAR

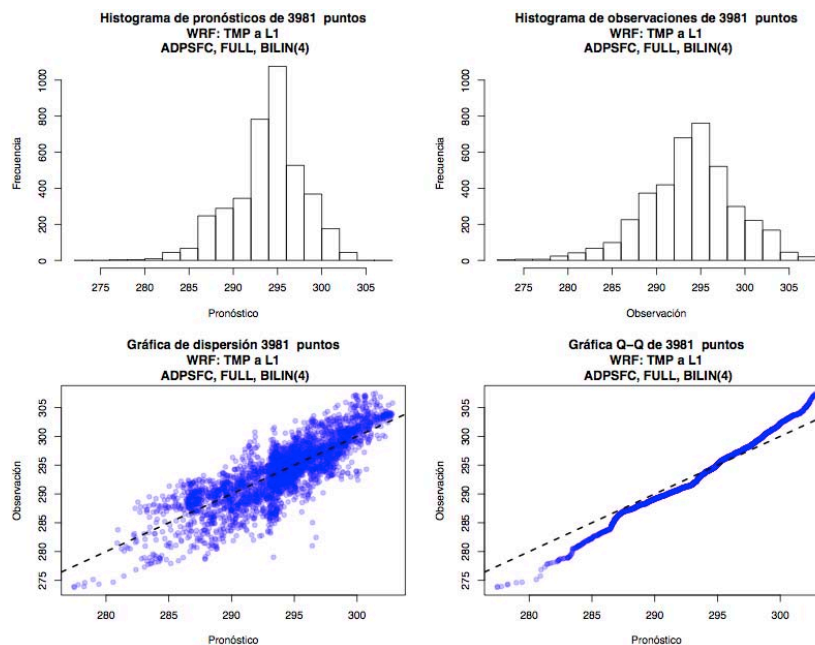
	Febrero (09-16)	Mayo (15-22)	Ago 30 - Sep 06	Noviembre (20-27)
<b>Temperatura</b>				
FBAR	293.98	297.55	300.34	296.51
FSTDEV	4.07	4.53	3.37	3.43
OBAR	293.88	298.47	300.25	296.98
OSTDEV	5.20	5.24	4.33	4.58
PR_CORR	0.84	0.91	0.69	0.88
RMSE	2.85	2.40	3.17	2.29
<b>Humedad Relativa</b>				
FBAR	68.45	73.06	80.08	75.79
FSTDEV	17.55	14.74	13.06	12.87
OBAR	66.66	71.57	81.08	74.98
OSTDEV	25.59	20.61	15.75	16.03
PR_CORR	0.47	0.58	0.45	0.40
RMSE	23.31	17.16	15.34	16.05
<b>Componente U del viento</b>				
FBAR	-0.78	0.79	0.95	-0.74
FSTDEV	3.45	4.04	3.94	3.24
OBAR	-1.10	-0.60	1.07	-0.30
OSTDEV	10.06	10.65	9.22	10.55
PR_CORR	0.36	0.32	0.35	0.48
RMSE	9.40	10.21	8.67	9.45
<b>Componente V del viento</b>				
FBAR	-2.98	-0.61	0.65	-2.12
FSTDEV	4.26	3.83	4.60	3.71
OBAR	-3.47	0.05	1.10	-2.04
OSTDEV	12.02	11.03	10.79	11.03
PR_CORR	0.44	0.38	0.43	0.55
RMSE	10.85	10.24	9.75	9.52

Se observa que para la temperatura se cumple que  $OSTDEV \approx FSTDEV$  y también que  $RMSE < OSTDEV$  en los cuatro periodos (Pielke, 1984). Para las otras variables sólo se cumple la segunda condición ya que el valor de la desviación estándar de los pronósticos no es semejante al valor de la desviación estándar de las observaciones. Debido a esto, el desempeño del modelo es alto al reproducir los valores de mediciones de temperatura pero no lo es para la humedad relativa y las componentes del viento con respecto a la base de datos de observaciones de SEMAR.

Por otra parte observa que para la temperatura los valores del coeficiente de Pearson varían entre 0.69 y 0.91 en los cuatro periodos mientras que para las componentes del viento, las correlaciones oscilan entre 0.32 y 0.48 en el caso de la componente zonal y entre 0.38 y 0.55 para la componente meridional. En el caso de la humedad relativa se observa que la correlación de los datos es también débil con valores que van desde 0.40 hasta 0.58.

En seguida se muestran los histogramas, diagramas de dispersión y gráficos cuantil-cuantil para la temperatura, humedad relativa y las componentes del viento en el periodo correspondiente a febrero para la base de datos de SEMAR, con el objetivo de complementar la Tabla 6.8. Las gráficas para los periodos en los meses de mayo, septiembre y noviembre se muestran en el Anexo 9.9.

### Temperatura

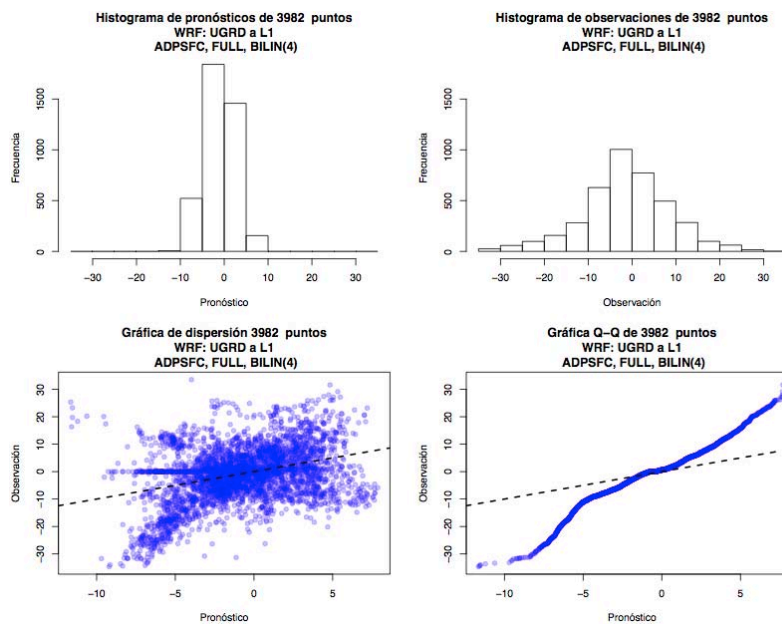


**Figura 6.21** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en febrero.

Para el caso de la temperatura se observa en los histogramas que el modelo sobrestima las frecuencias de los valores entre 292 K y 295 K pero subestima las frecuencias más pequeñas menores a 284 K. En el diagrama de dispersión se observa

que la gran mayoría de los puntos se encuentran sobre la recta o cercanos a ésta, lo cual indica una correlación fuerte y positiva. Esto viene apoyado con el valor de 0.84 del coeficiente de Pearson mostrado en la Tabla 6.8. Por otro lado, en el gráfico cuantil-cuantil se observa que la distribución de los datos del modelo se aproxima a la distribución de las mediciones, son obstante, existen diferencias por debajo de los valores de 287 K y por arriba de los 300 K

### Componente U del viento

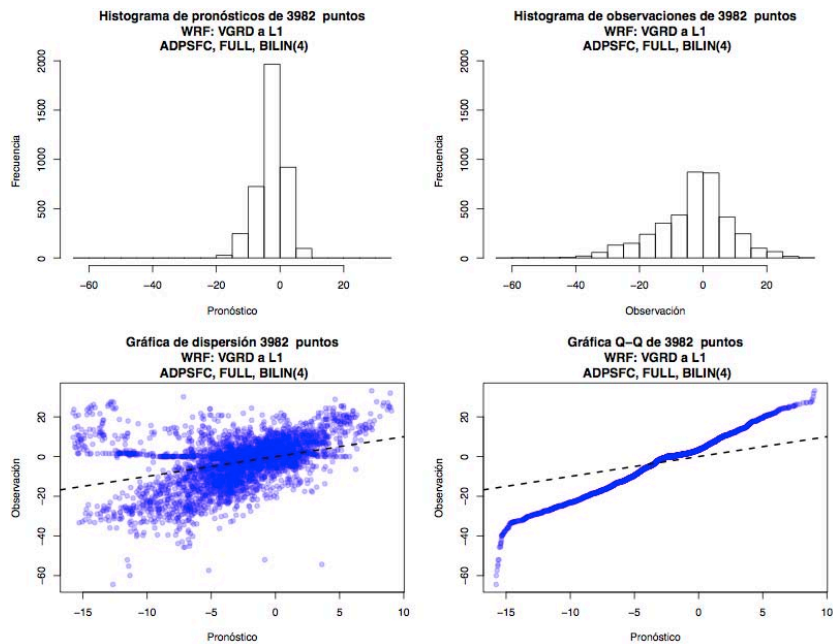


**Figura 6.22** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en febrero.

Para la componente U del viento se muestra que el modelo sobrestima las frecuencias de los valores cercanos a cero y que no reproduce los valores extremos, por lo tanto no reproduce el sesgo de los datos de medición.

En el diagrama de dispersión no se observa que los datos se agrupen fuertemente sobre la recta, lo cual se traduce en una correlación débil entre los datos. El coeficiente de Pearson tiene un valor de 0.36 (Tabla 6.8), lo cual concuerda con lo mostrado en el diagrama de dispersión. Por último en el gráfico cuantil-cuantil se observa que los puntos no se encuentran sobre la recta por lo que la distribución de los datos de mediciones no es similar a la distribución de los pronósticos.

## Componente V del viento

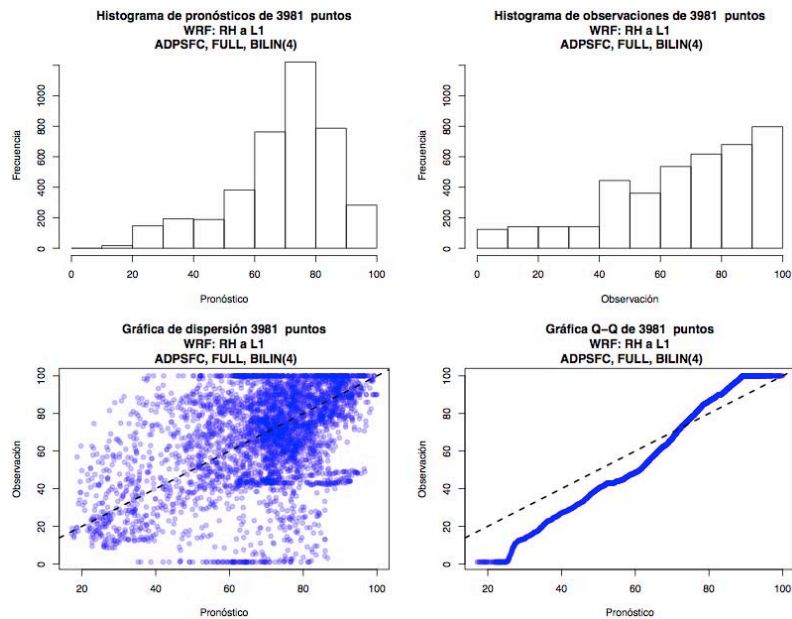


**Figura 6.23** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en febrero.

Para la componente meridional del viento se observa que el modelo sobrestima las frecuencias de los valores entre -10 m/s y 0 m/s, asimismo no reproduce las frecuencias de los valores menores a -15 m/s o mayores a 10 m/s. Por otra parte, en el diagrama de dispersión se muestra que los datos no se agrupan sobre una recta sino que se encuentran sobre un área mayor, lo cual implica una correlación débil entre los datos. Esto concuerda con el valor de 0.44 del coeficiente de Pearson mostrado en la Tabla 6.8.

En cuanto al gráfico cuantil-cuantil se muestra que los puntos no caen sobre la recta, lo cual se interpreta como que los datos de pronóstico y observaciones no presentan distribuciones similares.

## Humedad relativa



**Figura 6.24** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en febrero.

En lo que respecta a la humedad relativa se observa en los histogramas que el modelo sobrestima las frecuencias de los valores entre 60% y 90% y además no reproduce correctamente las frecuencias de los valores extremos. Asimismo, en el diagrama de dispersión se muestra que la mayoría de los puntos se localiza cerca del 80% pero no se tiene una tendencia clara, lo que indica una correlación débil de los datos concordando con el valor de 0.47 del coeficiente de Pearson mostrado en la tabla 6.8. Finalmente en el gráfico cuantil-cuantil no se observa que los puntos se agrupen sobre la recta, además de que se presentan discrepancias en los valores extremos. Por lo tanto, los datos de pronóstico y los datos de observaciones no tienen distribuciones semejantes.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- Se demostró que las emisiones marítimas de los buques afectan la calidad del aire en el centro del país, siendo este efecto más representativo en las variaciones de concentración de  $PM_{2.5}$  llegando a alcanzar una diferencia del 16.70% entre escenarios.
- Con la base de datos GDAS se obtuvo una buena simulación de temperatura, humedad relativa y las componentes del viento, por lo que resulta ser una base de datos de información meteorológica confiable. Sin embargo, resulta importante resaltar que el periodo donde se obtienen mejores resultados de acuerdo con los valores del coeficiente de Pearson, corresponde a la semana del mes de mayo.
- En cuanto a la base de datos de SEMAR, se observa que el modelo reproduce la temperatura para los cuatro periodos de estudio, no obstante, el modelo no reproduce de forma precisa las observaciones de las componentes del viento y la humedad relativa. Tomando como base el valor del coeficiente de Pearson se puede ver que los mejores resultados se obtienen para el periodo correspondiente a la semana de mayo tanto para la temperatura como la humedad relativa mientras que en el periodo de la semana de noviembre se obtienen mejores resultados para las componentes del viento.
- En cuanto a las comparaciones con la base de datos de la RAMA se observa que el modelo tiene un desempeño de hasta 0.26 para el ozono y de hasta 0.59 para el material particulado tomando como base el valor del coeficiente de Pearson. Sin embargo, esto se explica en parte a que posiblemente el inventario subestime las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (precursores de ozono) o bien debido a la resolución utilizada en este trabajo de investigación en



particular, ya que permite ver el impacto a nivel regional pero no a escalas locales pequeñas.

- Se observó, también, en los mapas de comparación de escenarios que en algunas zonas aumenta la concentración de las variables químicas, mientras que en otras disminuye. Entonces se percibe que la disminución de las emisiones marítimas y la concentración de ozono y  $PM_{2.5}$  en el centro del país no se relacionan linealmente. Igualmente, es necesario destacar que el periodo donde el modelo se desempeñó mejor para el pronóstico de ozono corresponde a la semana del mes de febrero, en cambio, para  $PM_{2.5}$  resulta ser el periodo de la semana del mes noviembre.
- En general, las zonas más afectadas por las emisiones de los buques son las costas por lo que una reducción en las emisiones marítimas sugiere que tanto la concentración de ozono como material particulado disminuirían en estas áreas.
- Con respecto al análisis estadístico de las variables meteorológicas en la superficie marina con los datos de GDAS se observa que en el Océano Pacífico y en el Golfo de México se obtienen buenas correlaciones entre los datos de pronóstico y de observaciones para la temperatura, las componentes del viento y la humedad relativa, a excepción de algunos casos donde es posible que fenómenos de escala menor que el modelo no puede pronosticar afecten el resultado.

## **RECOMENDACIONES**

- Se necesita hacer una revisión, y posible modificación, detallada de los inventarios de emisiones con el fin de tener una mayor precisión en la modelación de la calidad del aire en el país y consecuentemente ayudar a

mejorar los pronósticos, en particular las emisiones relacionadas a los compuestos orgánicos volátiles y los dióxidos de nitrógeno.

- Realizar más investigación para comprender el efecto del cambio de emisiones y las concentraciones de ozono y material particulado.
- Profundizar el conocimiento del impacto de las emisiones marítimas en la calidad de aire y sus efectos a la salud, ecosistemas y materiales.
- Evaluar escenarios de reducción de emisiones con base en reguladores y tecnologías disponibles.
- Se recomienda establecer estaciones de monitoreo activas y confiables en más ciudades y regiones del país con el fin de poder entender los procesos transporte de contaminantes, además de contar con una base de datos ampliada sobre la cual se pueda evaluar el desempeño del modelo en otras zonas además del centro del país.
- Dado que el pronóstico de la calidad del aire está sumamente relacionado con la meteorología y la química, se hace hincapié en la necesidad de mayor comunicación entre las personas que estudian estas ciencias, o bien, se deben formar estudiantes capacitados con el objetivo que el pronóstico en la calidad del aire mejore cada vez más.
- Se hace énfasis en que es necesario tener una red de monitoreo atmosférica de calidad a nivel nacional. Esta red debe contar con mantenimientos oportunos para todos los equipos de medición de cada estación con el objetivo de construir una base de datos confiable para extensos periodos de tiempo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Sein, J., Pandis S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics* (2da ed.). Canada: Wiley
- Wark, K., Warner, C. (2013). *Contaminación del aire, origen y control*. México: Limusa.
- Roland, B., Stull. (2003). *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Barbara J. Finlayson-Pitts, James N. Pitts Jr. (2000). *Chemistry of the upper and lower atmosphere*. Academic Press
- Tie, X., Madronich, S., Li G., Ying Z., Zhang R., García A., et al. (2006). Characterizations of chemical oxidants in Mexico City: A regional chemical dynamical model (WRF-Chem) study. *Atmospheric Environment*.
- Velaso, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina J., et al. (2007). Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of México during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Velaso, E., Lamb, B., Pressley S., Allwine, E., Westberg, H., Jobson B.T., et al. (2005). Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape. *Geophysical Research Letters*.
- Apel, E.C., Emmons, L.K., Karl, T., Flocke, F., Hills, A.J., Madronich, S., et al. (2010). Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan área. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- García, J.A., Jazclevich, A., Ruiz, L.G., Torres, R., Suárez M., Reséndiz N.A. (2009). Ozone weekend effect analysis in Mexico City. *Atmósfera*, vol. 22, núm 3, pp. 281-297.

- García, J.S., García J.A., Jazcilevich, A., Ruiz, L.G. (2014). The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmósfera*, vol. 27, num 2, pp. 215-225.
- Lei, W., Zavala, M., De Foy, B., Volkamer, R., Molina L.T. (2008) Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Sheehy, P.M., Volkamer, R., Molina L.T., Molina M.J. (2010). Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere – Part 2: A ROx radical cycling perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Dusanter, S., Vimal, D., Stevens P. S., Volkamer, R., Molina L.T., et al. (2009) Measurements of OH and HO<sub>2</sub> concentrations during the MCMA-2006 field campaign – Part 2: Model comparison and radical Budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Tang, X. (1990). The Second Generation Regional Acid Deposition Model Chemical Mechanism for Regional Air Quality Modeling. *Journal of Geophysical Research*.
- Puigcerver M., Carrascal M. (2008). El medio atmosférico: meteorología y contaminación. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.
- ARW Modeling System User's Guide Weather Research & Forecasting, National Center for Atmospheric Research.
- WRF-Chem User's Guide (2014), Version 3.6
- Developmental Testbed Center. Model Evaluation Tools User's Guide, Version 4.1 (2013)

### **Páginas electrónicas recomendadas**

- <http://www.tibagroup.com/mx/maritimo>
- <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/terciario/transporte/maritimo.aspx?tema=E>
- <http://www.sct.gob.mx/puertos-y-marina/direccion-general-de-marina-mercante/estadisticas/>
- <http://www.inecc.gob.mx/calaire-informacion-basica/537-calaire-fuentes>
- <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/terciario/transporte/maritimo.aspx?tema=E>

## 9. ANEXOS

### 9.1 Características del modelo

#### 9.1.1 Modelo WRF

El WRF (Weather Research and Forecasting Model) es un sistema de modelado que ha estado en desarrollo desde hace unos años y el cual puede usarse en una gran variedad de aplicaciones en fenómenos atmosféricos con una escala que puede extenderse desde cientos de metros hasta cientos de kilómetros, por ejemplo:

- Simulaciones idealizadas y reales (procesos convectivos, ondas baroclínicas, etc.)
- Investigación sobre huracanes
- Investigación sobre clima regional
- Pronóstico del tiempo
- Parametrización de variables meteorológicas
- Investigación sobre aerosoles
- Investigación y pronóstico de calidad del aire

El modelo consiste principalmente de cuatro programas:

- WPS (WRF Preprocessing System)
- WRF-DA
- ARW Solver
- Post-processing and Visualization tools

#### 9.1.2 WPS

Algunas de sus funciones consisten en definir los dominios de la simulación, interpolar la información terrestre como lo es el terreno, el uso de suelo y los tipos de suelo.

#### 9.1.3 WRF-DA

Este programa es opcional y puede ser usado para ingresar información sobre las interpolaciones creadas por el WPS. También puede ser usado para actualizar las condiciones iniciales del modelo cuando el modelo WRF corre en un modo cíclico.

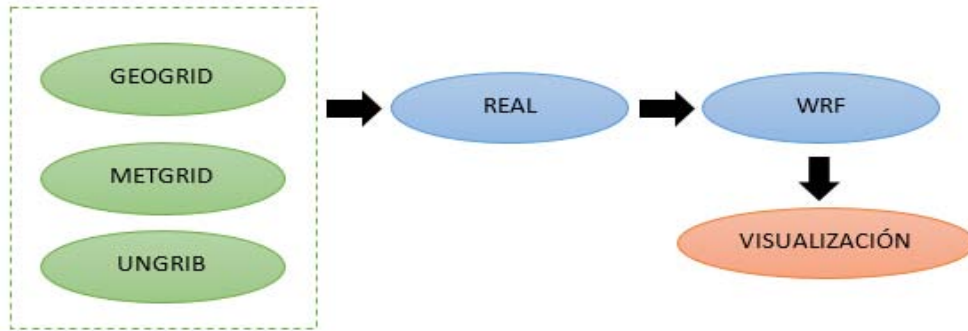
#### 9.1.4 ARW Solver

Es el componente clave de este sistema de modelación, el cual está compuesto por diversos programas de inicialización para simulaciones ideales y reales, además contiene el programa de integración numérica.

#### 9.1.5 Post-processing and visualization tools

Algunos programas que se usan para visualizar los archivos de salida del modelo son RIP4 (Read/Interpolate/Plot), NCL (NCAR Graphics Command Language), VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers), etc. En este estudio se usó el programa MET (Model Evaluation Tools) para hacer el análisis estadístico y el programa ncview para visualizar los archivos de salida.

La siguiente imagen resume lo anteriormente dicho:



**Figura 9.1** Esquema simplificado de las etapas de modelación del WRF.

### 9.1.6 Proceso de simulación con el modelo

Una vez que se obtuvieron los datos de reanálisis de NCAR, se procedió a editar los archivos *namelist.input* y *namelist.wps* correspondientes al programa WPS.

En los archivos *namelist.wps* y *namelist.input* se configuran la fecha de corrida, la ubicación del dominio, la resolución, el tipo de proyección del mapa que se usará, etc. Además el archivo *namelist.input* contiene módulos para microfísica, dinámica atmosférica y química atmosférica los cuales contienen diferentes opciones de parametrización para las diversas variables.

Después se creó una liga con el objetivo de que el modelo reconozca los archivos de entrada que contienen la meteorología, conozca la ubicación de los mismos y pueda hacer los cálculos e interpolaciones correspondientes.

Posteriormente, se ejecutó el programa *ungrib.exe.*, el cual extrae campos meteorológicos de archivos con formato GRIB. El siguiente paso consistió en ejecutar el programa *metgrid.exe*, el cual interpola horizontalmente los campos de meteorología extraídos por *ungrib.exe* a las mallas de modelo definidas por *geogrid*.

En seguida se ejecutó el programa *real.exe* el cual interpola verticalmente los campos meteorológicos a *niveles sigma* del WRF.

Una vez que finalizó el programa *real.exe* se ejecutó el comando *qsub cwrif.csh* con el cual se envió la orden a una supercomputadora de realizar todos los cálculos relacionados con la meteorología y la química atmosférica en los periodos semanales seleccionados, siendo RADM2 (Regional Acid Deposition Model version 2) el mecanismo químico en fase gaseosa que se usó debido a que toma en cuenta procesos atmosféricos químicos importantes como lo es la deposición ácida.

## 9.2 WRF-Chem

El modelo WRF-Chem ahora se encuentra como parte del modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Y debido a esta dependencia hacia el WRF se asume que cualquiera que use el WRF-Chem está familiarizado con el uso del WRF.

Algunos de los componentes del módulo del WRF-Chem son los siguientes:

- Deposición seca
- Opciones para emisiones biogénicas
- Opciones para emisiones antropogénicas
- Opciones para mecanismos químicos en la fase gaseosa
- Opciones para esquemas de fotólisis.
- Opciones para esquemas de aerosoles
- Opciones para incendios forestales

Se usó el mecanismo químico RADM2 (Regional Acid Deposition Model Version 2) para obtener las concentraciones de ozono y  $PM_{2.5}$  como datos de pronóstico del modelo en el área química.

La diferencia con el WRF regular está en la parte química del modelo, el cual necesita información de entrada adicional relacionada con las emisiones. Esta información de entrada adicional es proporcionada por el WPS o puede ser leído durante la inicialización del programa real.exe.

### **9.3 UPP (Unified Post-Processor)**

Es un paquete de programas que interpola las salidas del modelo a partir de mallas nativas del modelo. Procesa los archivos de salida del modelo y genera archivos con formato GRIB. Realiza interpolación vertical sobre coordenadas isobáricas, sigma, entre otras. Es recomendado para hacer un procesamiento posterior de las salidas previo a la verificación de los pronósticos con MET. MET requiere información de entrada en formato GRIB con niveles regulares o isobáricos en la vertical. EL UPP genera salidas en este formato.

### **9.4 Model Evaluation Tools (MET)**

MET es un conjunto de herramientas de verificación desarrolladas por la DTC (Developmental Testbed Center) para el uso de la comunidad en la predicción numérica del tiempo y ha sido desarrollado especialmente para aplicarse al modelo WRF. En términos generales algunas de sus funciones consisten en analizar estadísticamente en qué grado las observaciones se correlacionan con los valores de los pronósticos, y por lo tanto, es posible evaluar el desempeño del modelo.

Los pasos a seguir para correr el programa MET consisten de manera general en que a partir de los archivos de entrada, es decir las salidas del WRF, se generan salidas intermedias, se calculan los análisis estadísticos y por último se generan los archivos de salida finales que contienen la información de mediciones y pronósticos para cada una de las variables.

En la figura 9.2 se muestra de manera simple cada una de las etapas con las que cuenta MET.

#### **9.4.1 Descripción de herramientas dentro de METV4.1 (Version 4.1)**

##### **9.4.1.1 Point\_stat\_analysis**

La herramienta de Point-Stat provee estadística de verificación para pronósticos en los puntos de observación. Point-Stat hace coincidir los pronósticos en malla con las posiciones de los puntos de observación usando diferentes métodos de interpolación.

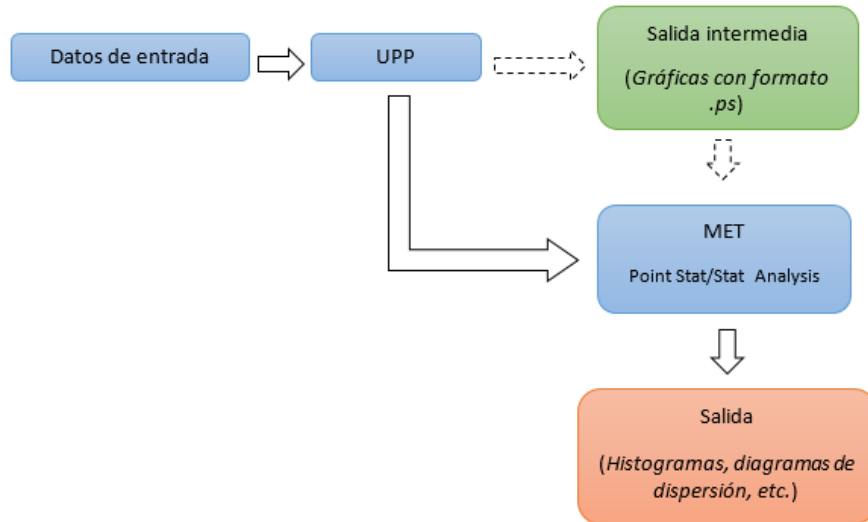


### 9.4.1.2 Stat\_analysis

Esta herramienta permite calcular variables estadísticas como son los promedios o desviaciones estándar para los pronósticos y observaciones, el coeficiente de Pearson, el error cuadrático medio, entre otras.

### 9.4.1.3 Rscript

Genera representaciones gráficas de las variables como lo son los histogramas, los diagramas de dispersión o los diagramas cuartil-cuartil.



**Figura 9.2** Esquema simplificado de las etapas de MET

En resumen, una vez que las salidas del modelo se convirtieron a formato GRIB1 con la herramienta UPP, el siguiente paso consistió en ejecutar los programas auxiliares para obtener los estadísticos: en primer lugar *marpol\_point\_stat\_2.csh* para GDAS y *marpol\_point\_stat\_semar.csh* para SEMAR y en segundo lugar *marpol\_stat\_snalysis.csh* para ambos casos.

## 9.5 NETCDF OPERATORS (NCO)

Netcdf Operators son un conjunto de programas conocidos como operadores. Cada operador es una línea de comando como lo son ls y mkdir en Linux. Los operadores toman los archivos netcdf como archivos de entrada, realizan una operación y producen un archivo netcdf como salida. Estos operadores tienen como función principal ayudar en la manipulación y análisis de información. Algunas de las aplicaciones de estos operadores es el procesamiento de archivos de salida de modelos climáticos.

## 9.6 Comparación del modelo con datos GDAS en superficie terrestre

### 9.6.1 Mayo

#### Temperatura

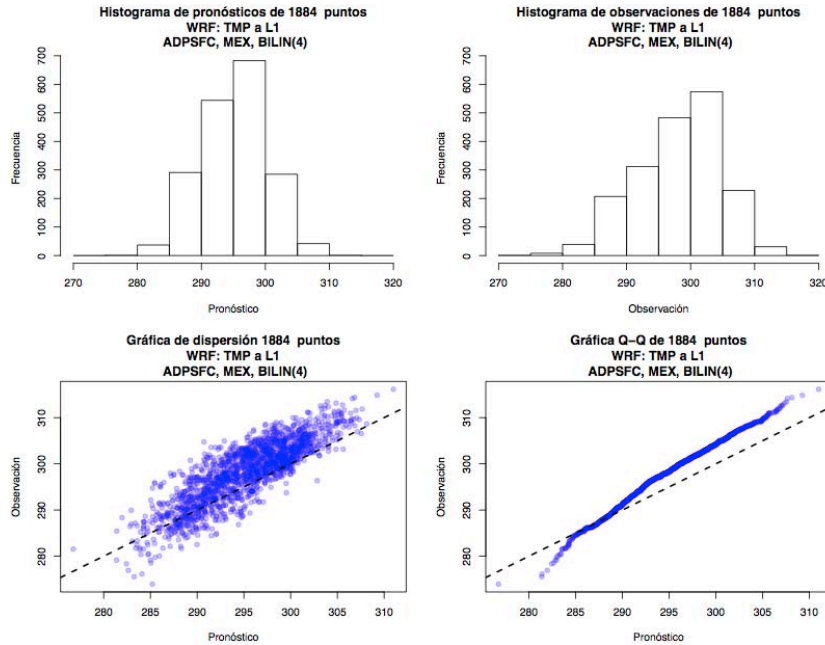


Figura 9.3 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en mayo

#### Componente U del viento

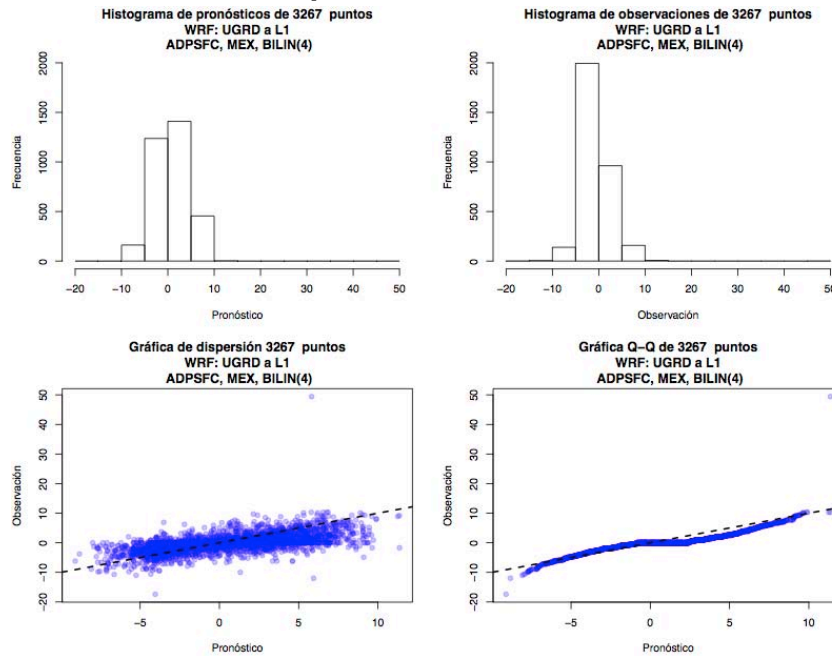
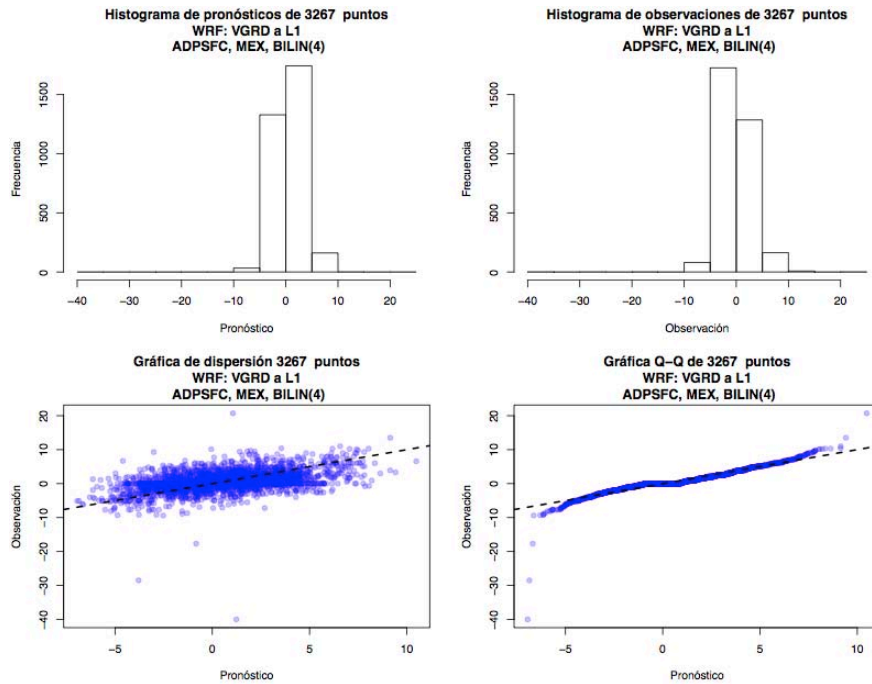


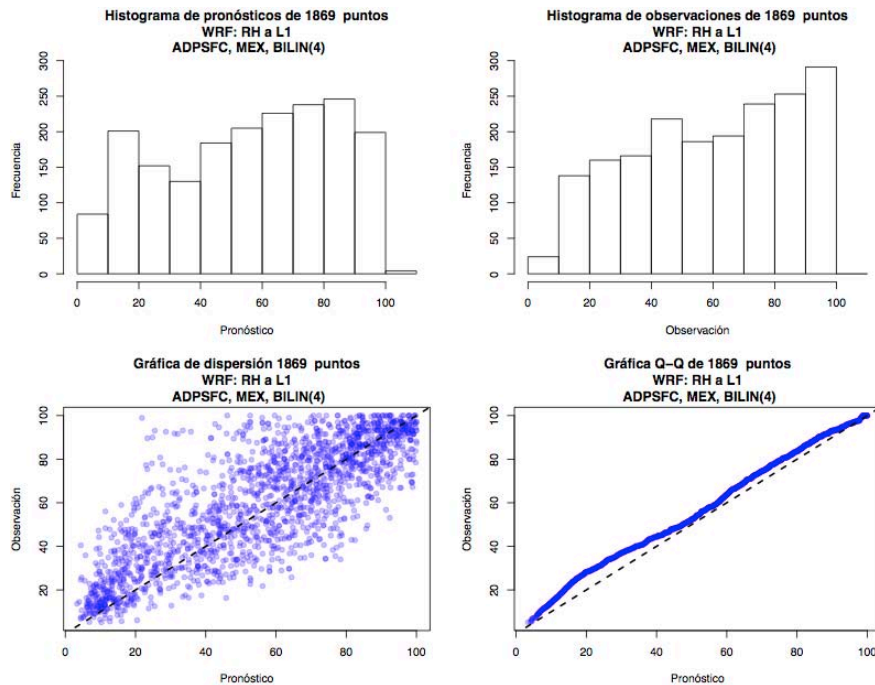
Figura 9.4 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo

## Componente V del viento



**Figura 9.5** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo

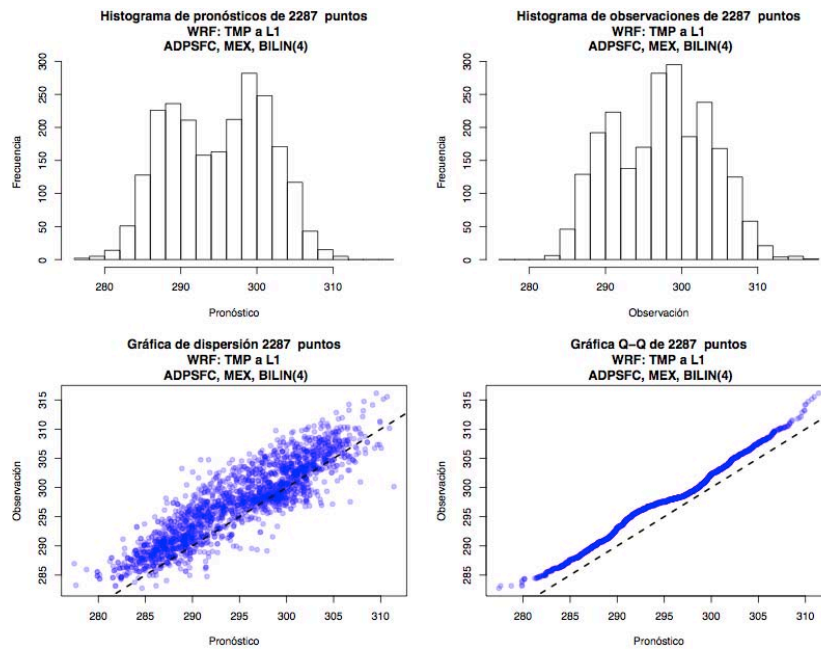
## Humedad relativa



**Figura 9.6** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en mayo

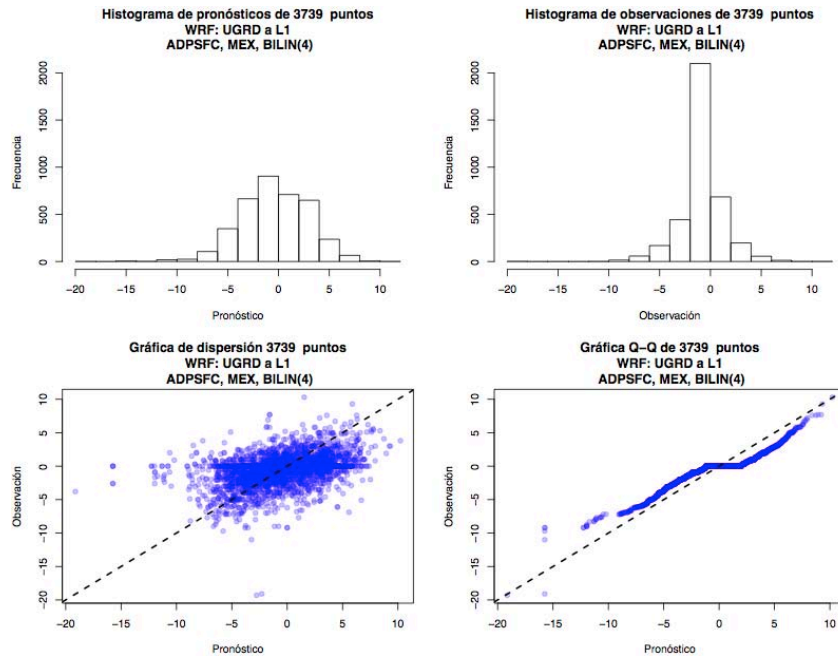
## 9.6.2 Septiembre

### Temperatura



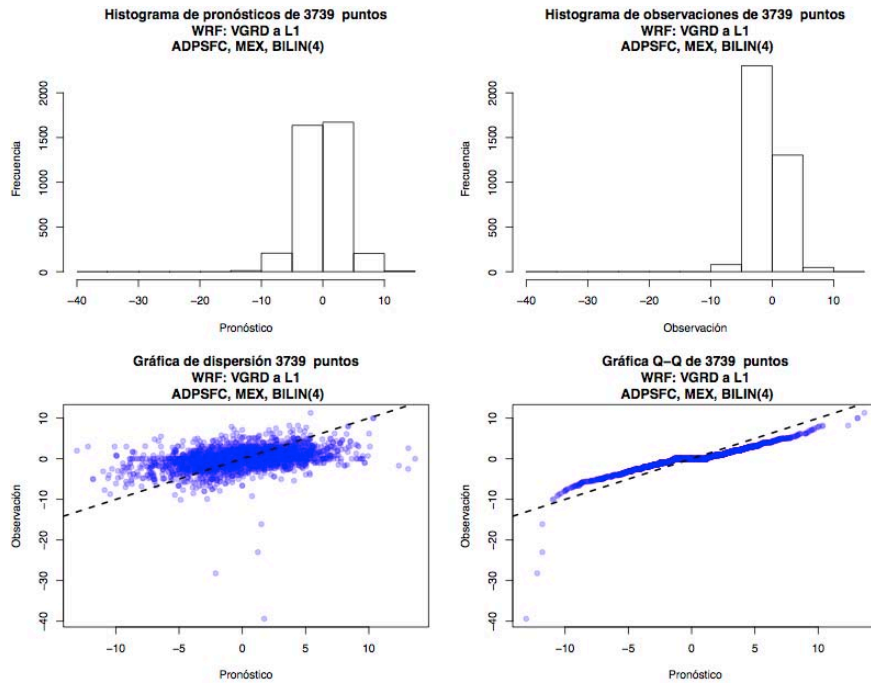
**Figura 9.7** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en septiembre

### Componente U del viento



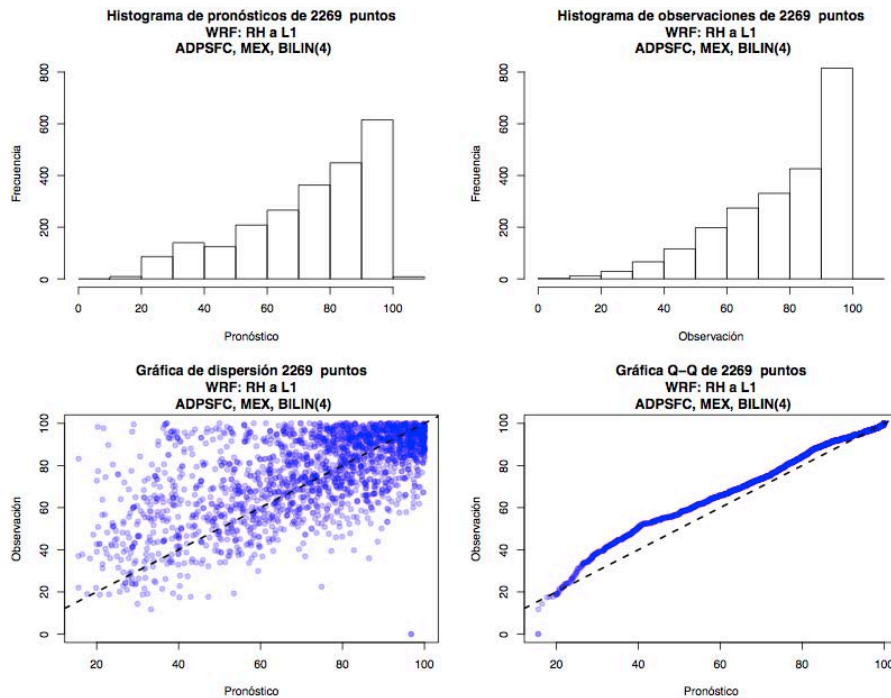
**Figura 9.8** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre

## Componente V del viento



**Figura 9.9** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre

## Humedad relativa



**Figura 9.10** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en septiembre

### 9.6.3 Noviembre

## Temperatura

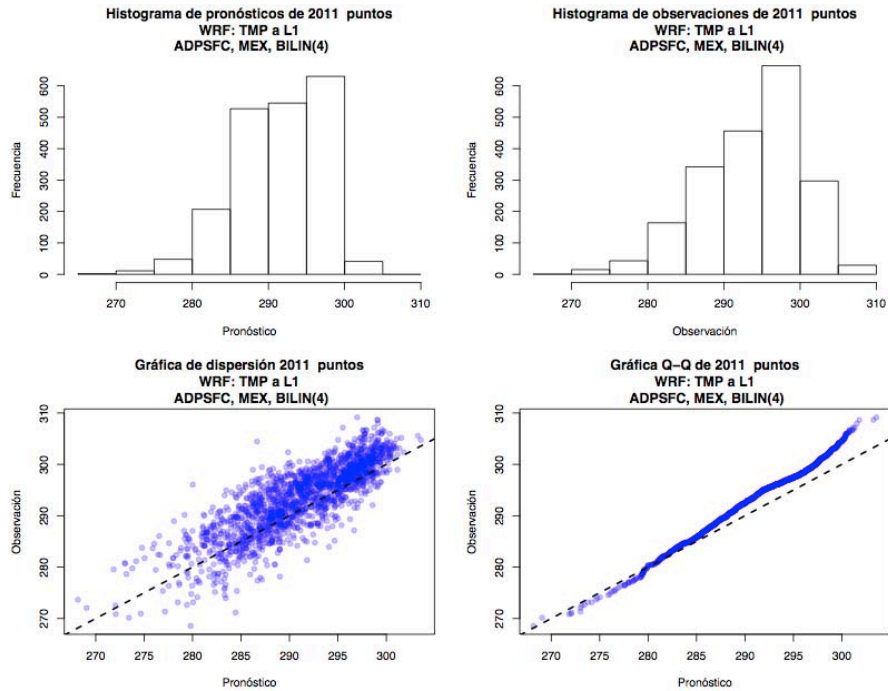


Figura 9.11 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la temperatura en noviembre

## Componente U del viento

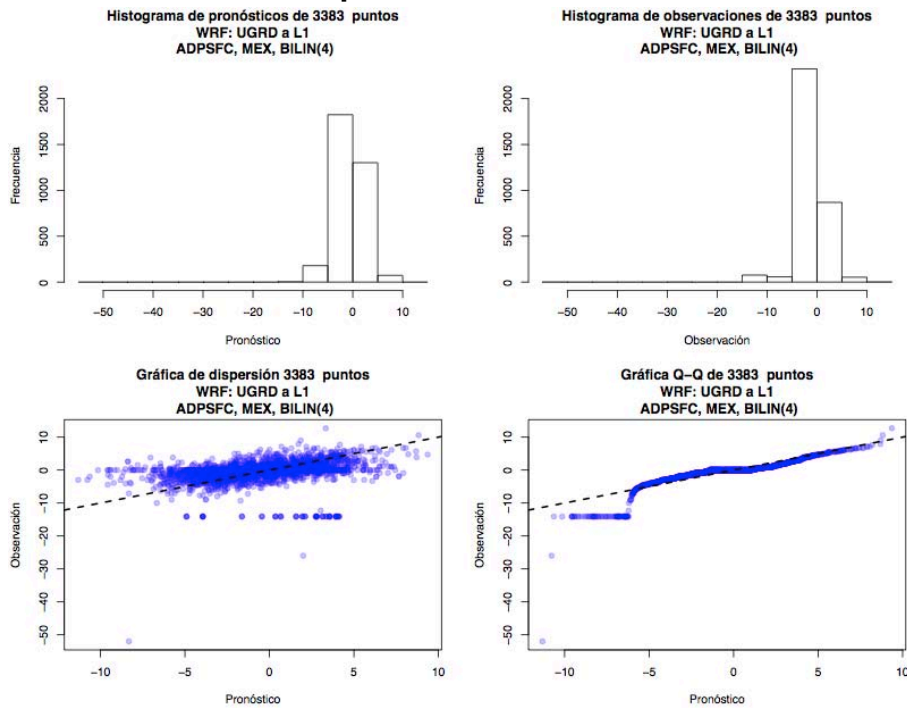
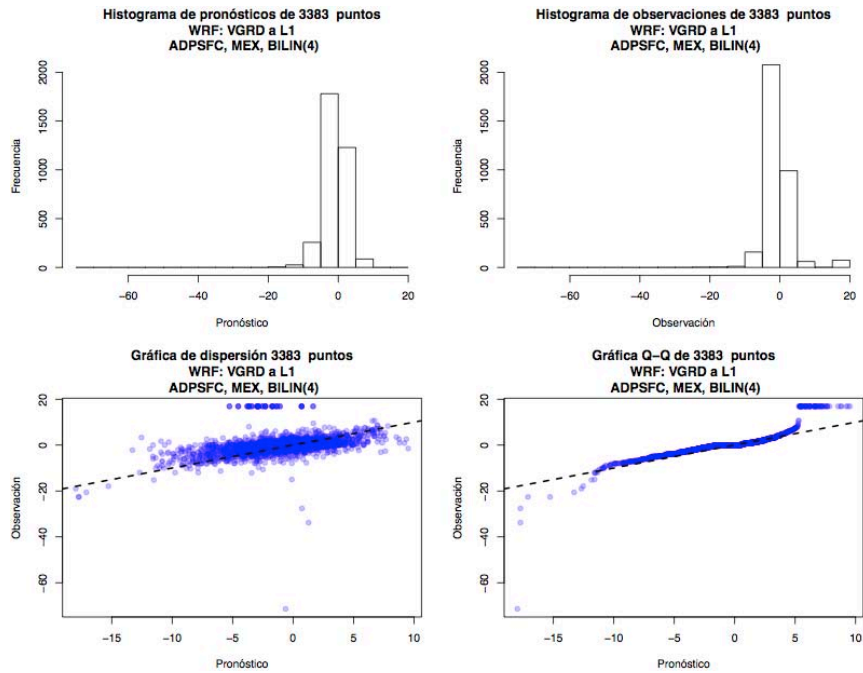


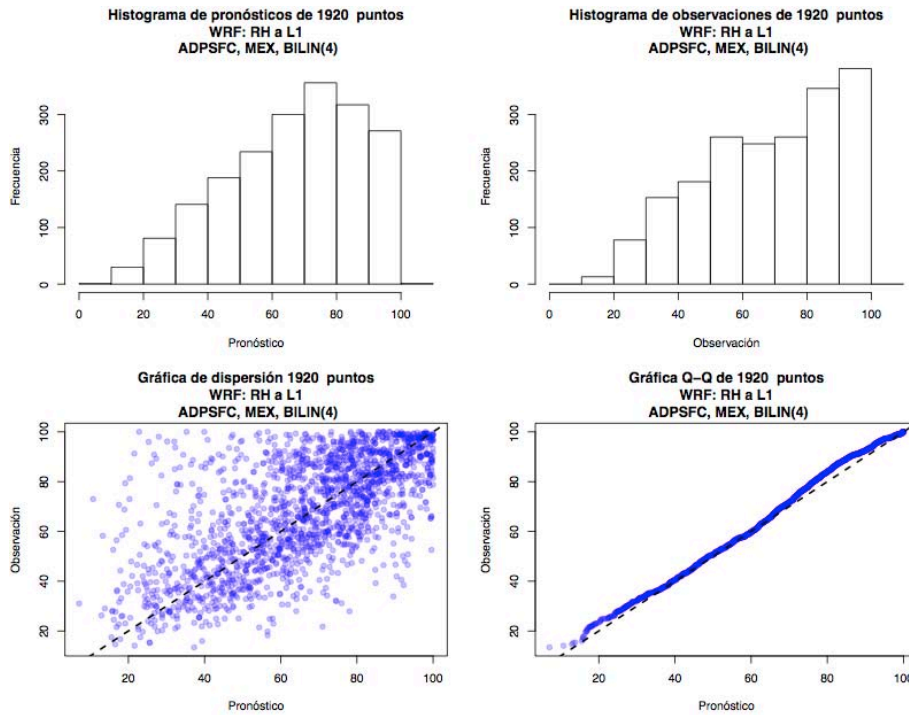
Figura 9.12 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente zonal del viento en noviembre

## Componente V del viento



**Figura 9.13** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre

## Humedad relativa



**Figura 9.14** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en superficie terrestre y los pronósticos para la humedad relativa en noviembre

## 9.7 Comparación del modelo con datos GDAS en superficie marina del Golfo de México

### 9.7.1 Mayo

#### Temperatura

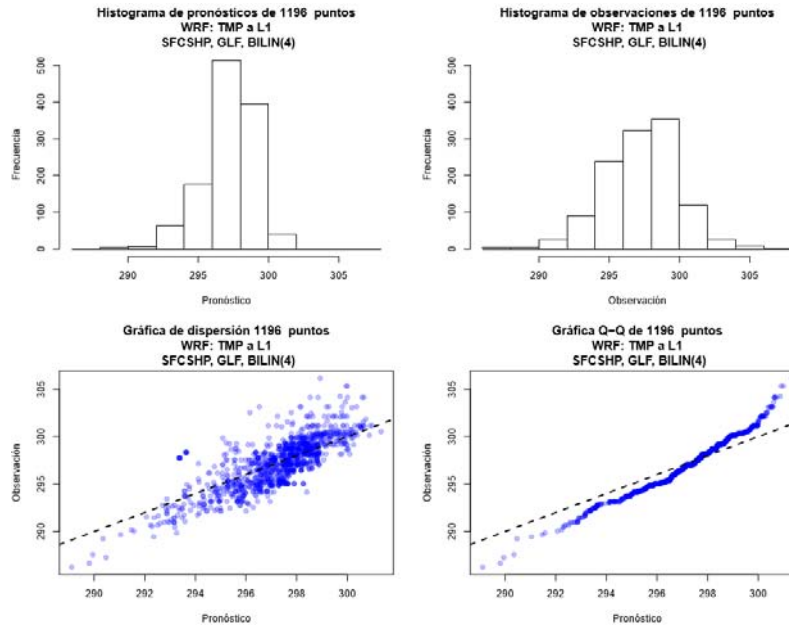


Figura 9.15 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en el mes de mayo

#### Componente U del viento

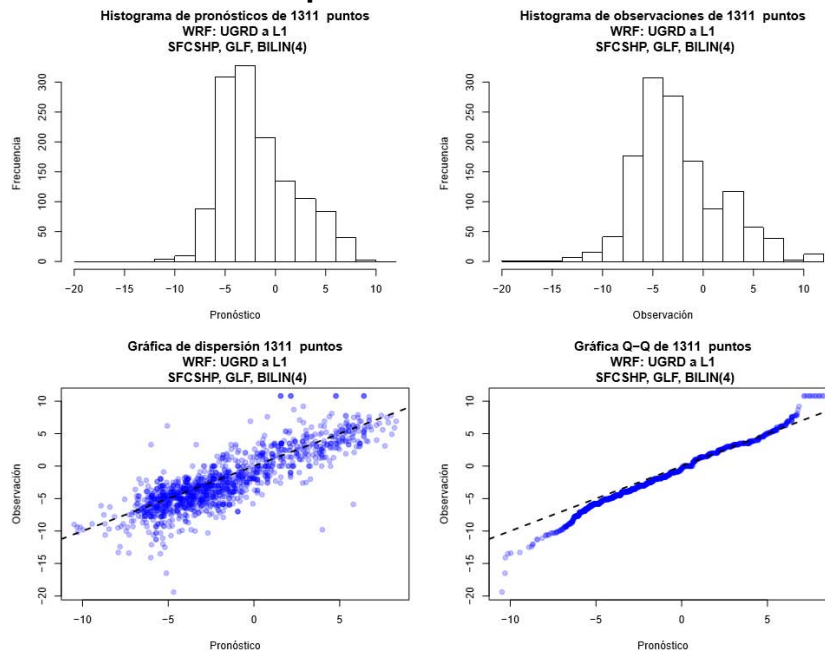
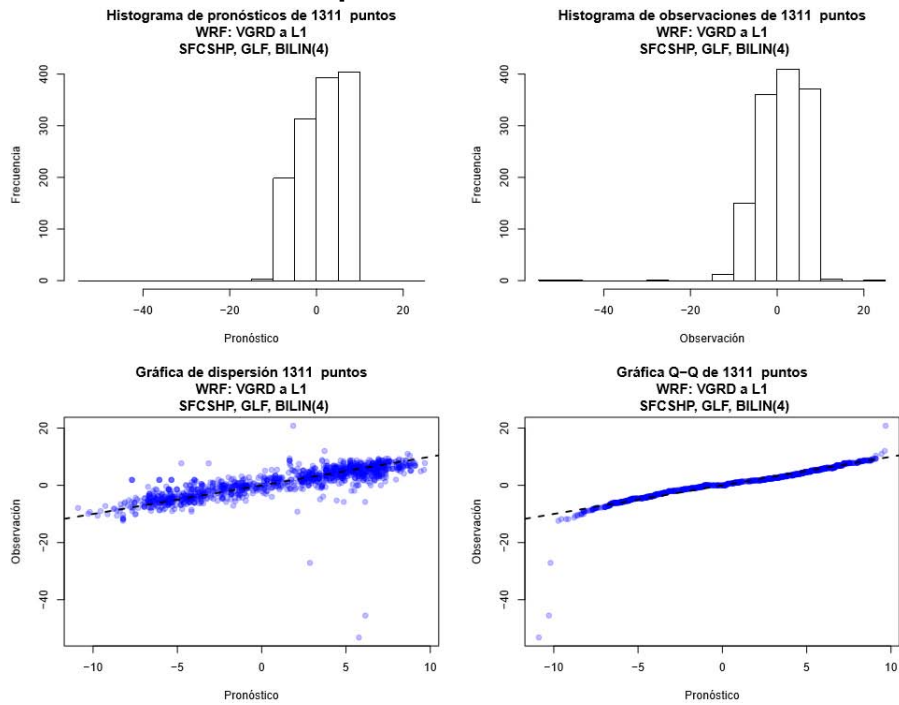


Figura 9.16 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo

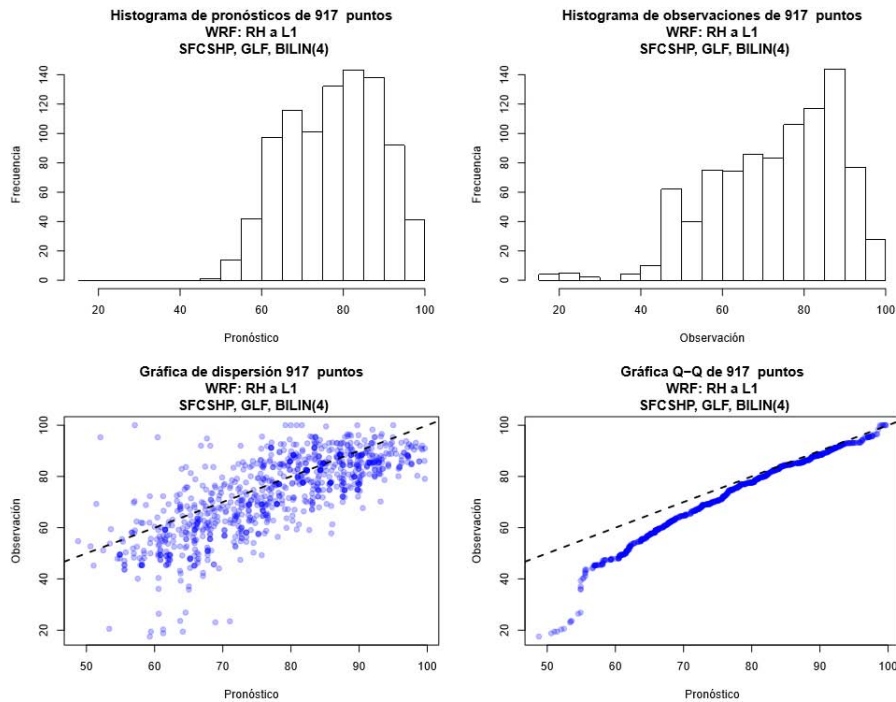


## Componente V del viento



**Figura 9.17** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo

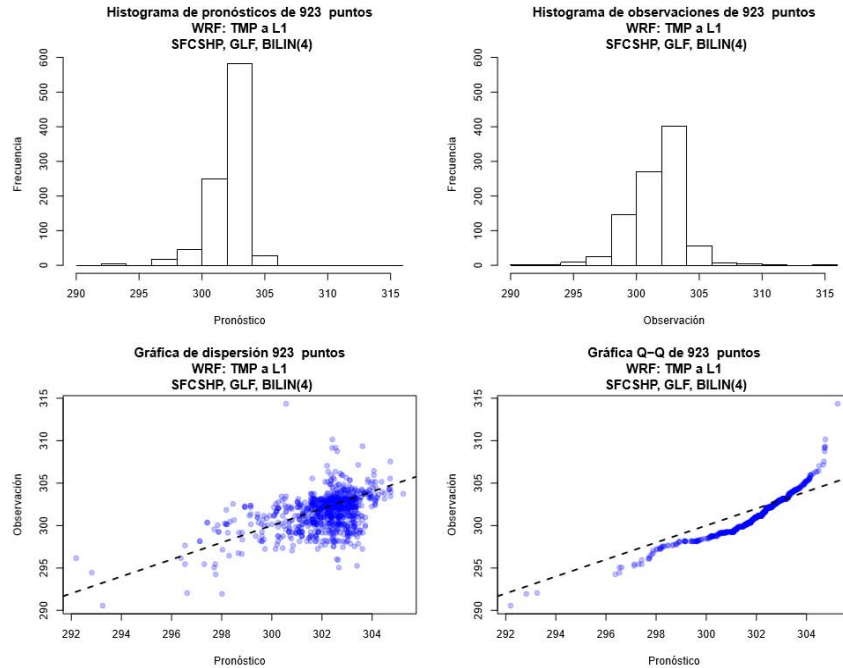
## Humedad relativa



**Figura 9.18** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en mayo

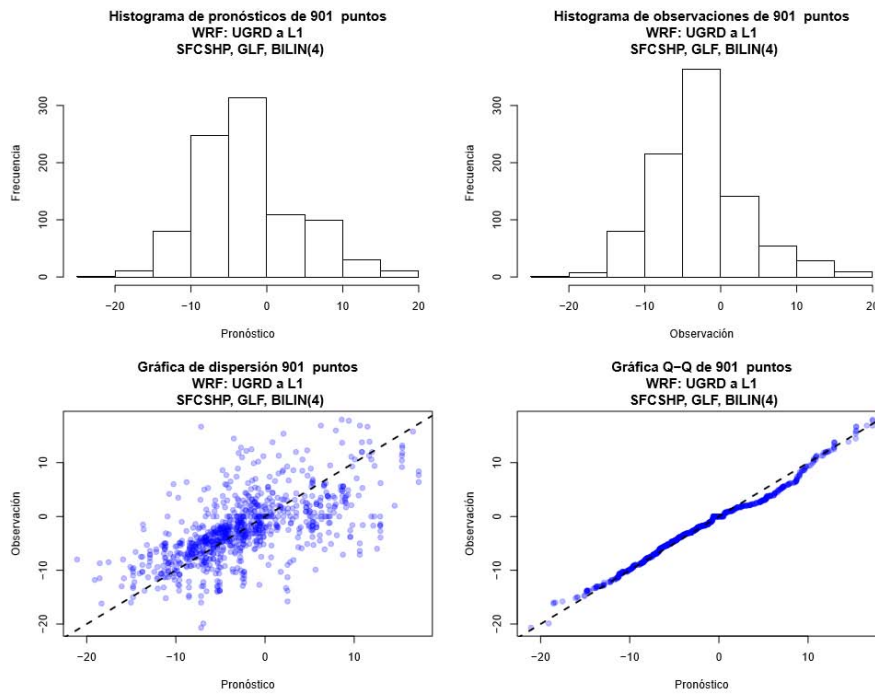
## 9.7.2 Septiembre

### Temperatura



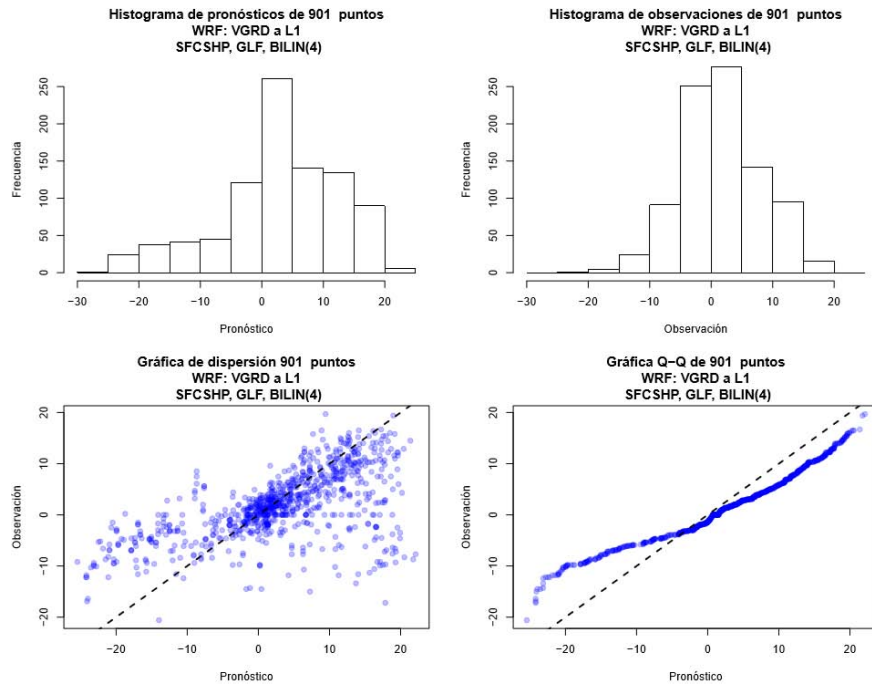
**Figura 9.19** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en septiembre

### Componente U del viento



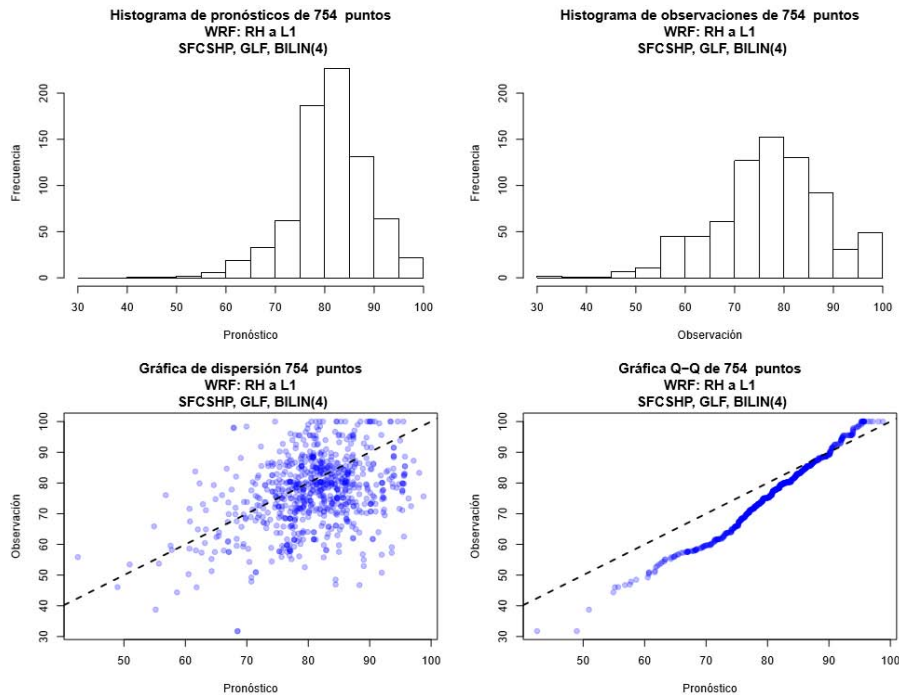
**Figura 9.20** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre

## Componente V del viento



**Figura 9.21** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre

## Humedad relativa



**Figura 9.22** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en septiembre

### 9.7.3 Noviembre

## Temperatura

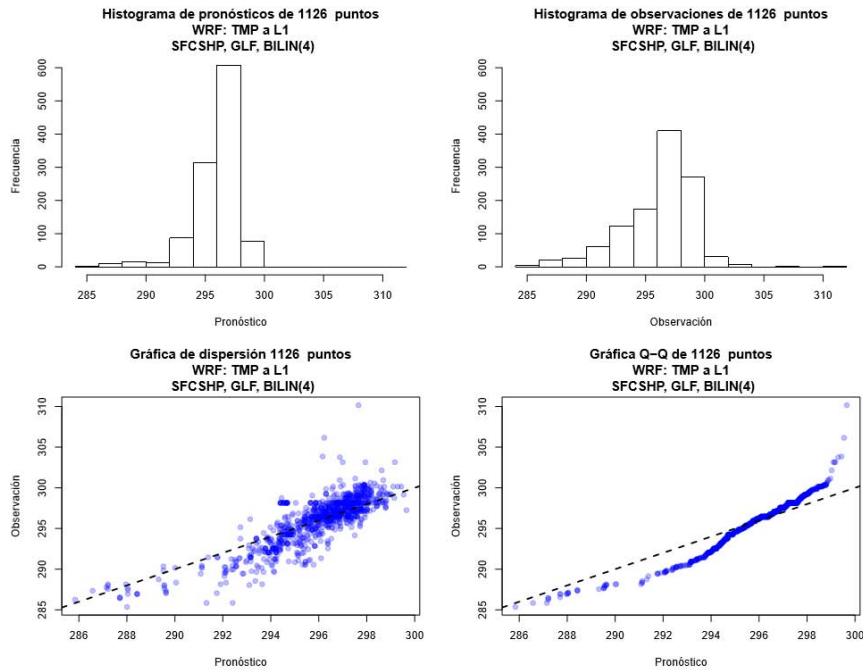


Figura 9.23 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la temperatura en noviembre

## Componente U del viento

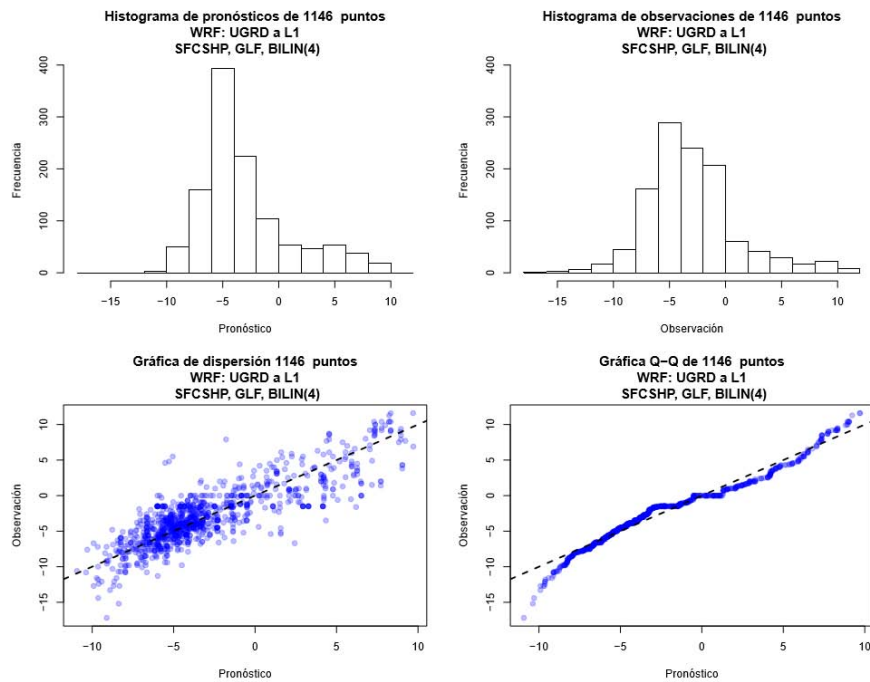
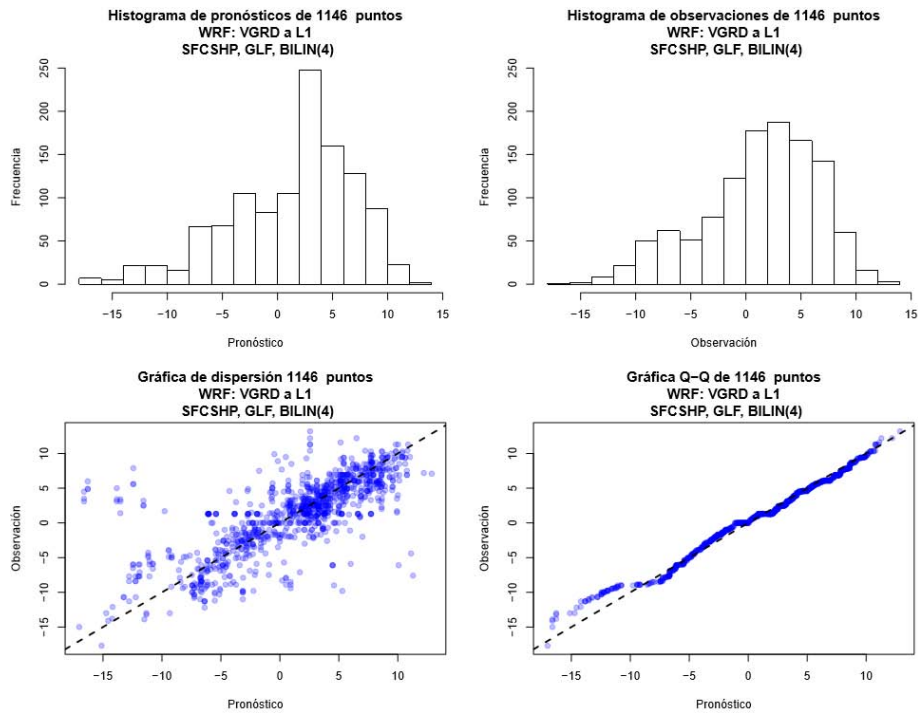


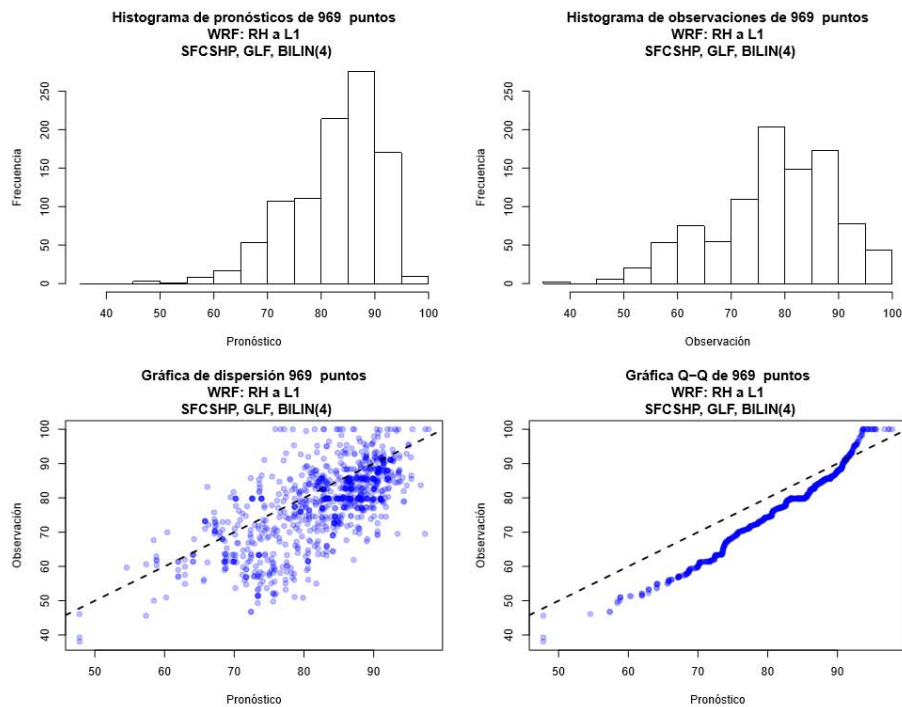
Figura 9.24 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente zonal en noviembre

## Componente V del viento



**Figura 9.25** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre

## Humedad relativa



**Figura 9.26** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Golfo de México y los pronósticos para la humedad relativa en noviembre

## 9.8 Comparación del modelo con datos GDAS en superficie marina del Océano Pacífico

### 9.8.1 Mayo

#### Temperatura

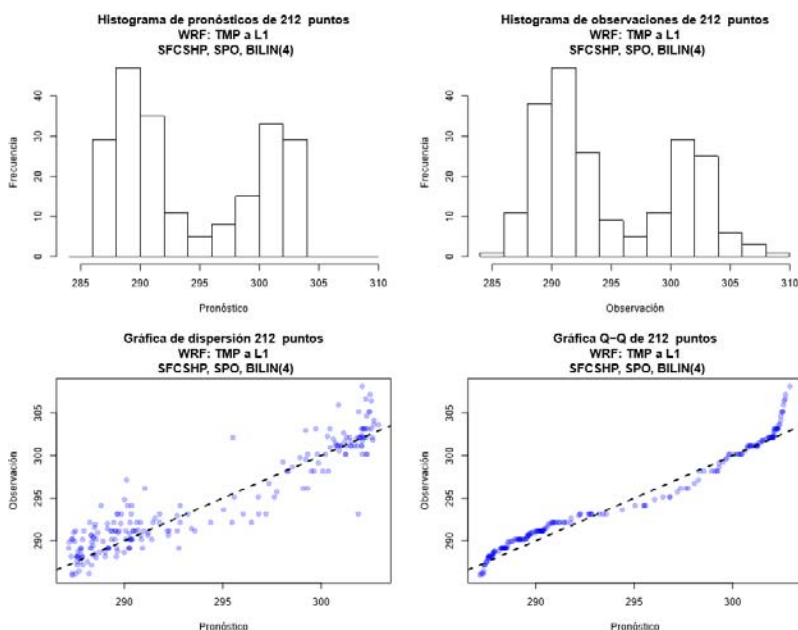


Figura 9.27 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la temperatura en mayo

#### Componente U del viento

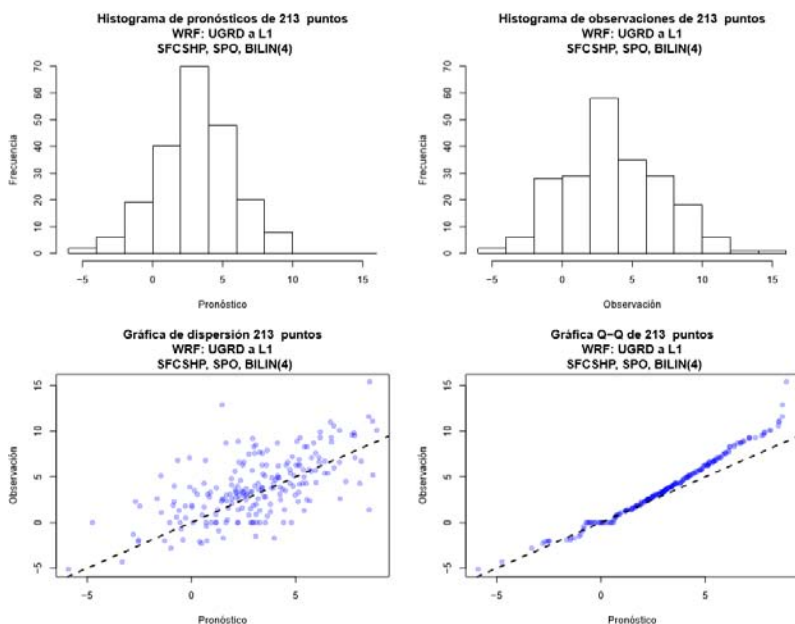
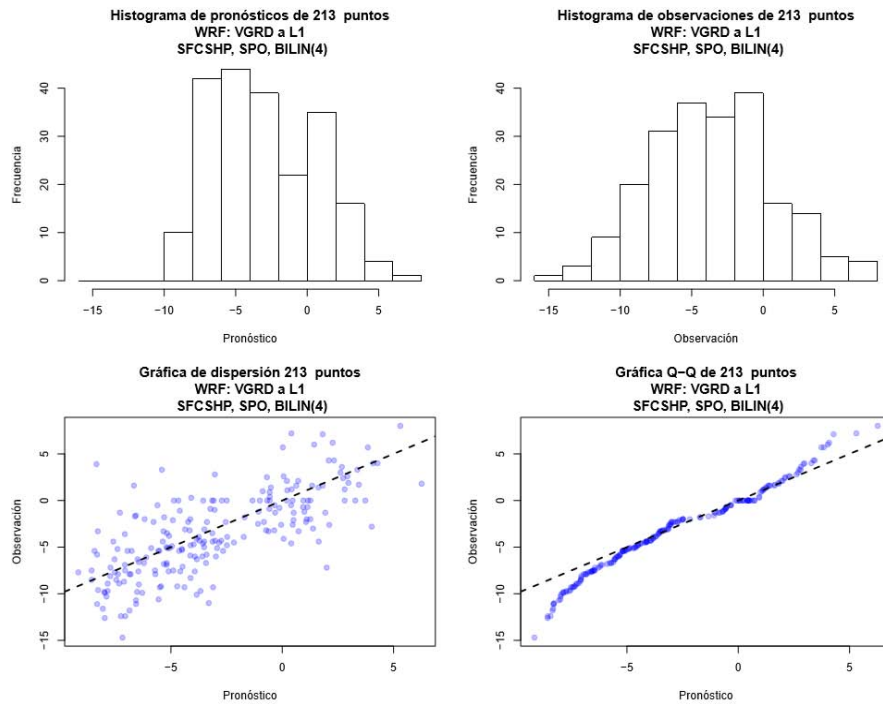


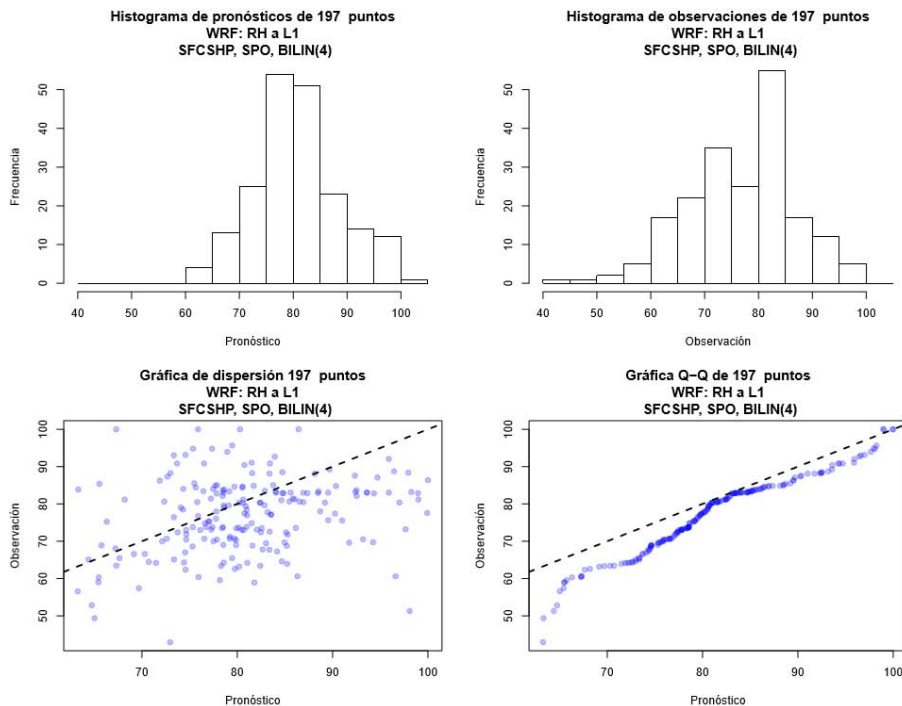
Figura 9.28 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo

## Componente V del viento



**Figura 9.29** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo

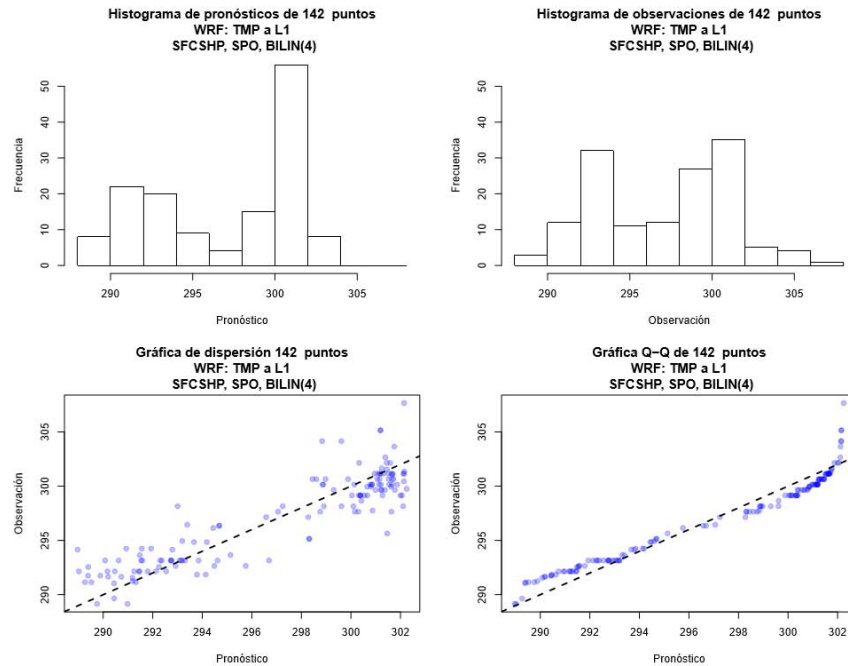
## Humedad relativa



**Figura 9.30** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la humedad relativa en mayo

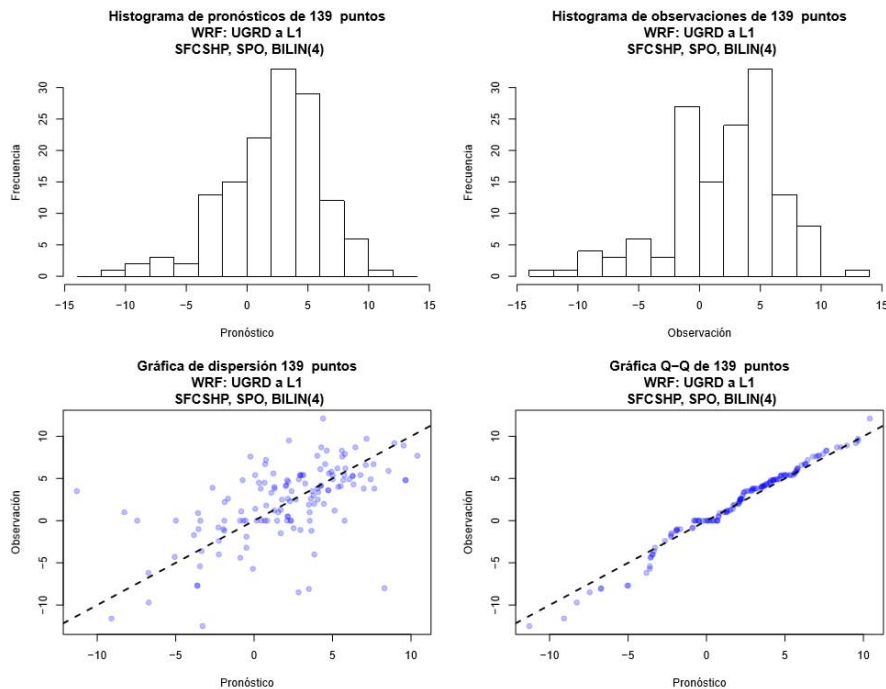
## 9.8.2 Septiembre

### Temperatura



**Figura 9.31** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la temperatura en septiembre

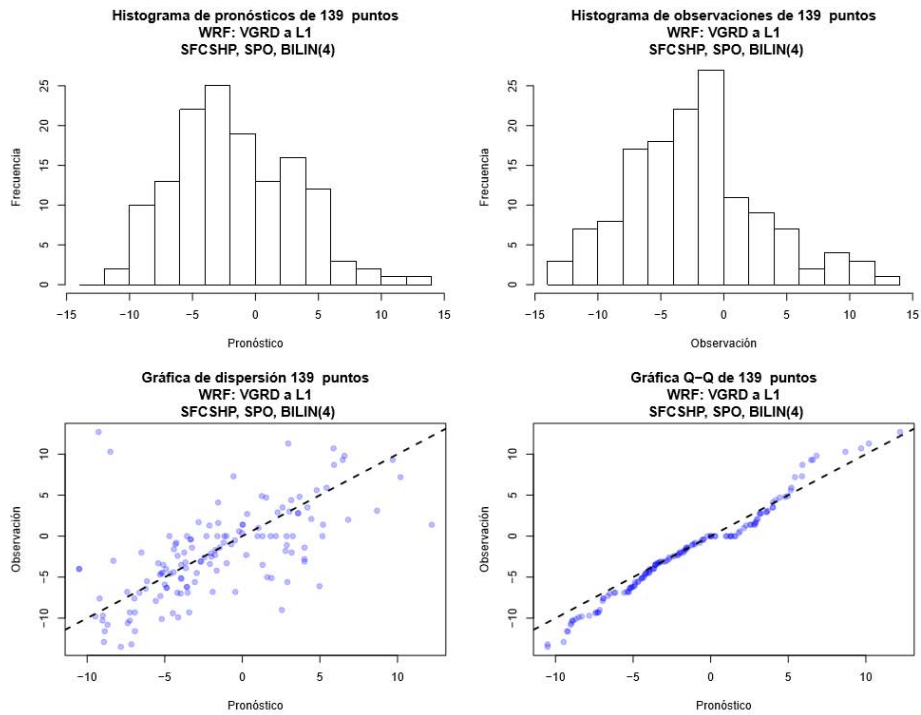
### Componente U delo viento



**Figura 9.32** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre

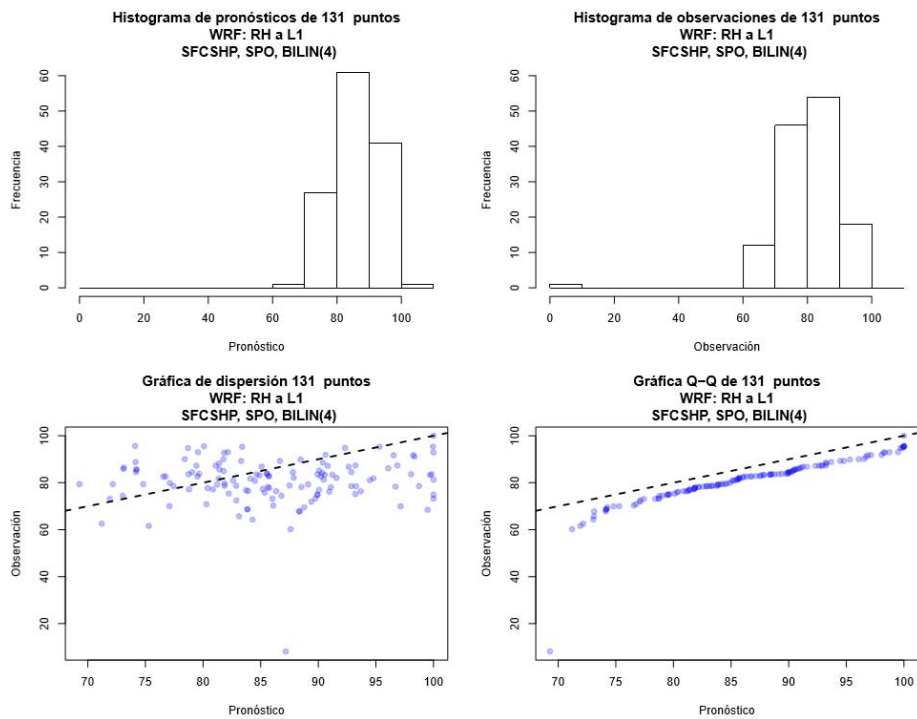


## Componente V del viento



**Figura 9.33** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre

## Humedad relativa



**Figura 9.34** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre

### 9.8.3 Noviembre

## Temperatura

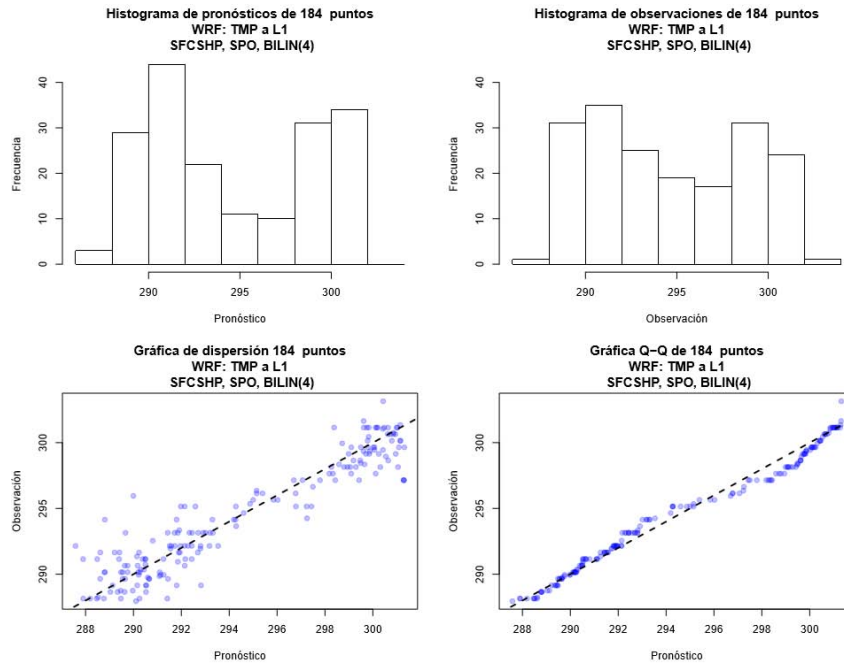


Figura 9.35 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la temperatura en noviembre

## Componente U del viento

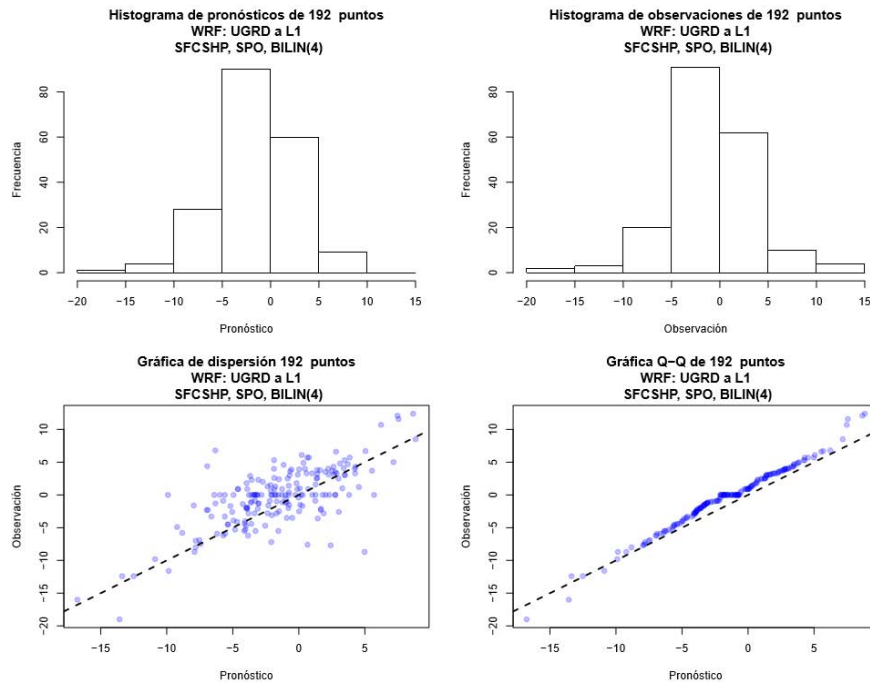
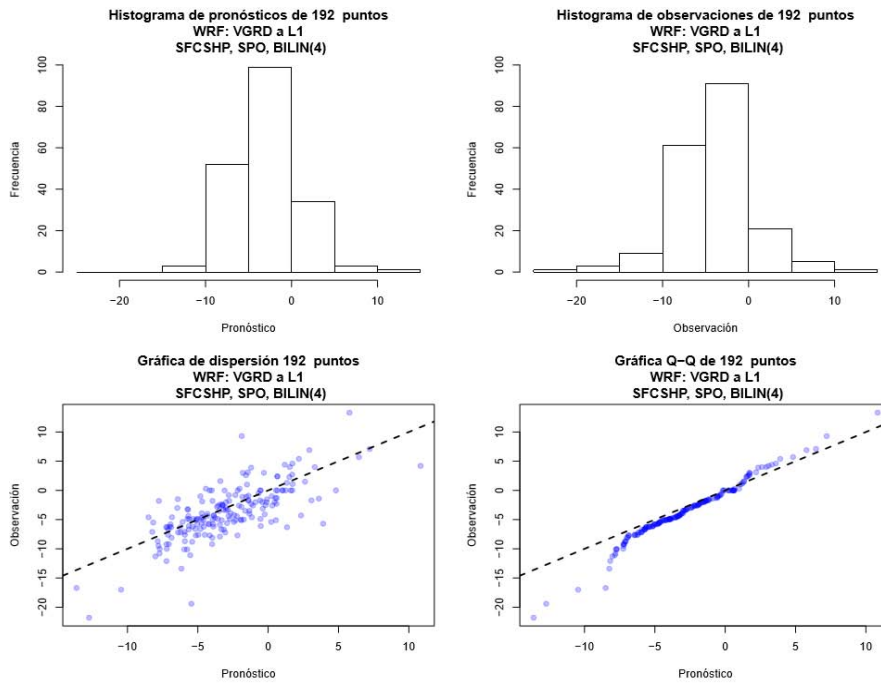


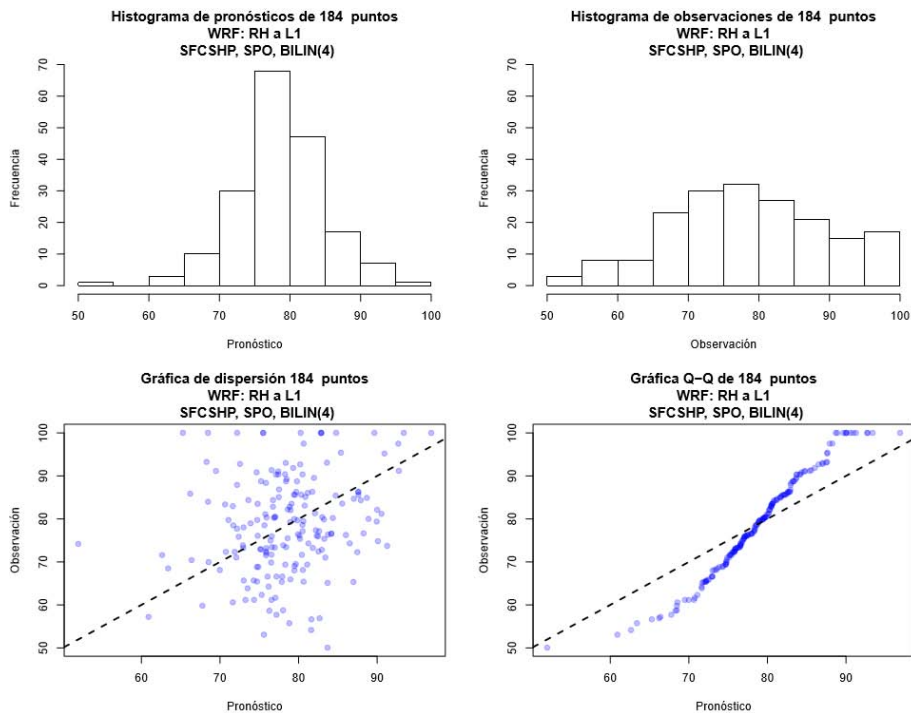
Figura 9.36 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente zonal del viento en noviembre

## Componente V del viento



**Figura 9.37** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre

## Humedad relativa



**Figura 9.38** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos GDAS en el Océano Pacífico y los pronósticos para la humedad relativa en noviembre

## 9.9 SEMAR (Secretaría de Marina)

### 9.9.1 Mayo

### Temperatura

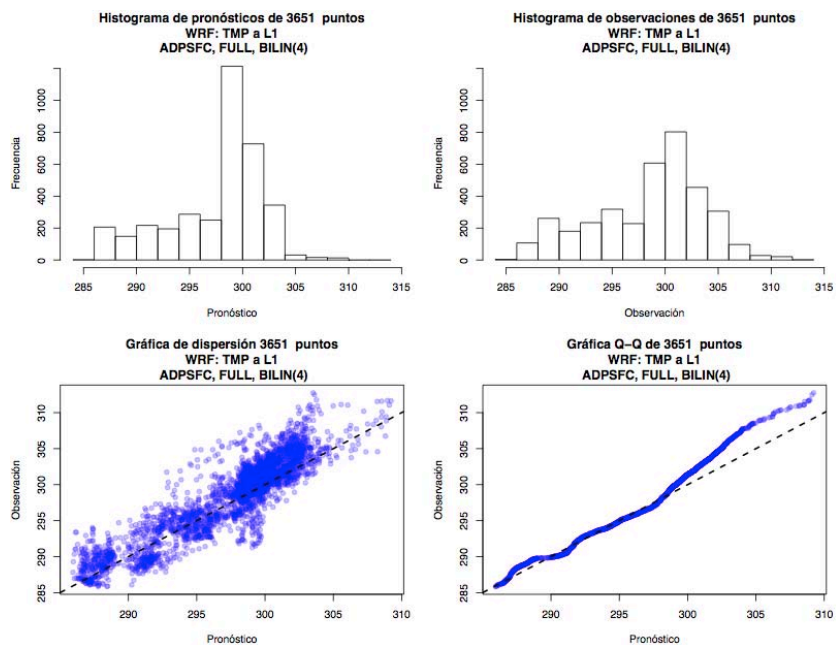


Figura 9.39 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en mayo

### Humedad relativa

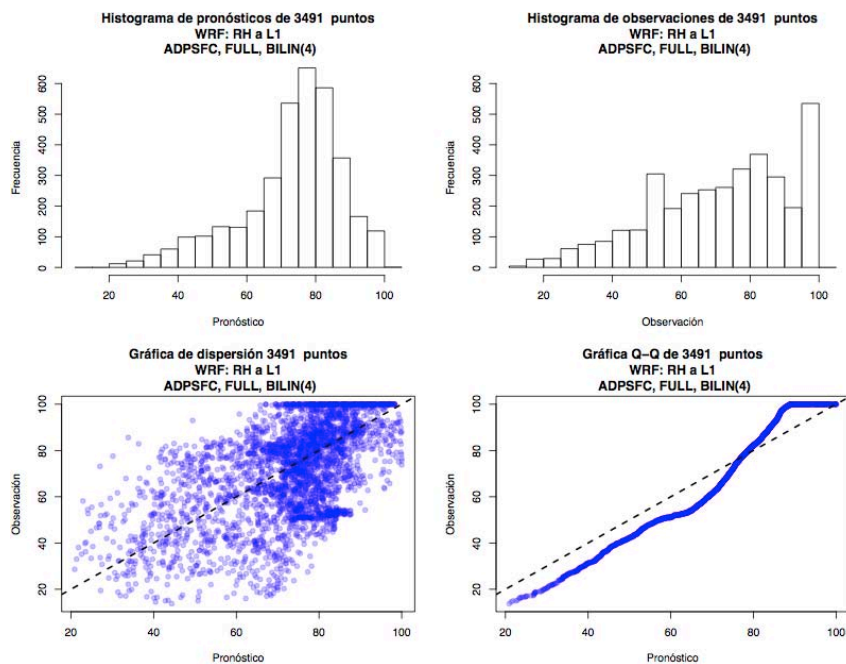


Figura 9.40 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en mayo

## Componente U del viento

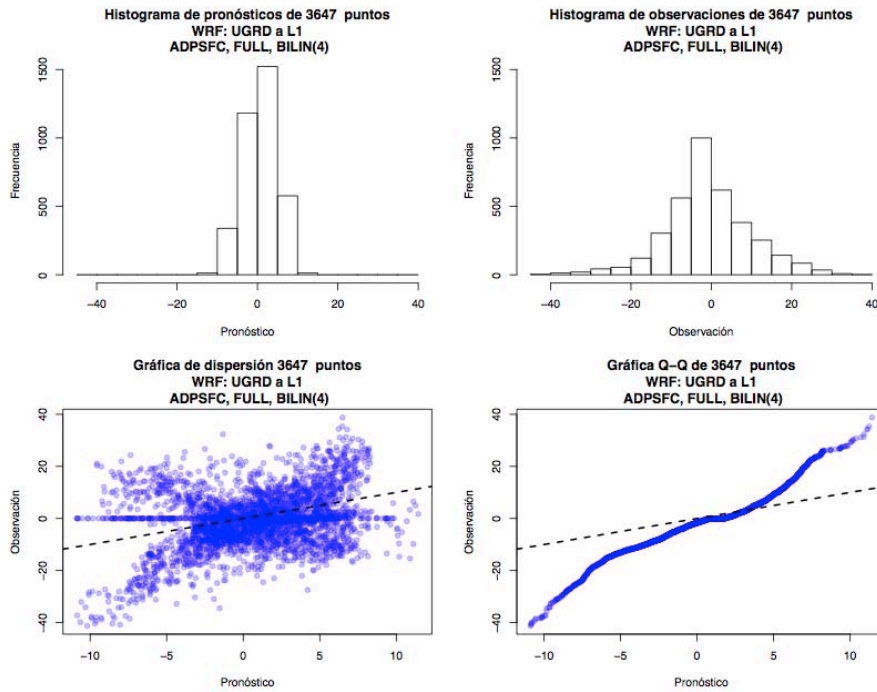


Figura 9.41 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en mayo

## Componente V del viento

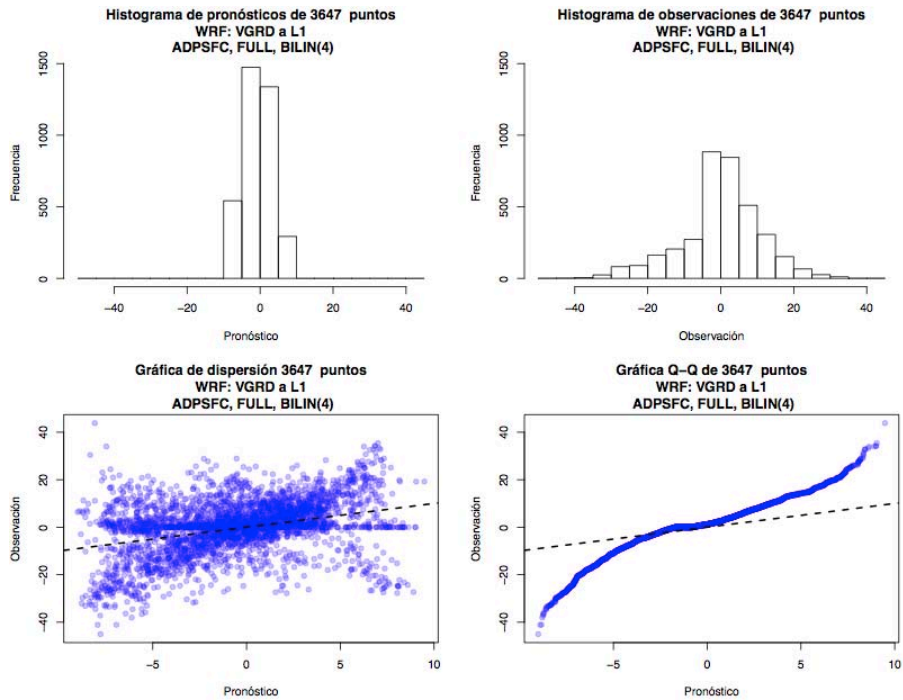


Figura 9.42 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en mayo

## 9.9.2 Septiembre

### Temperatura

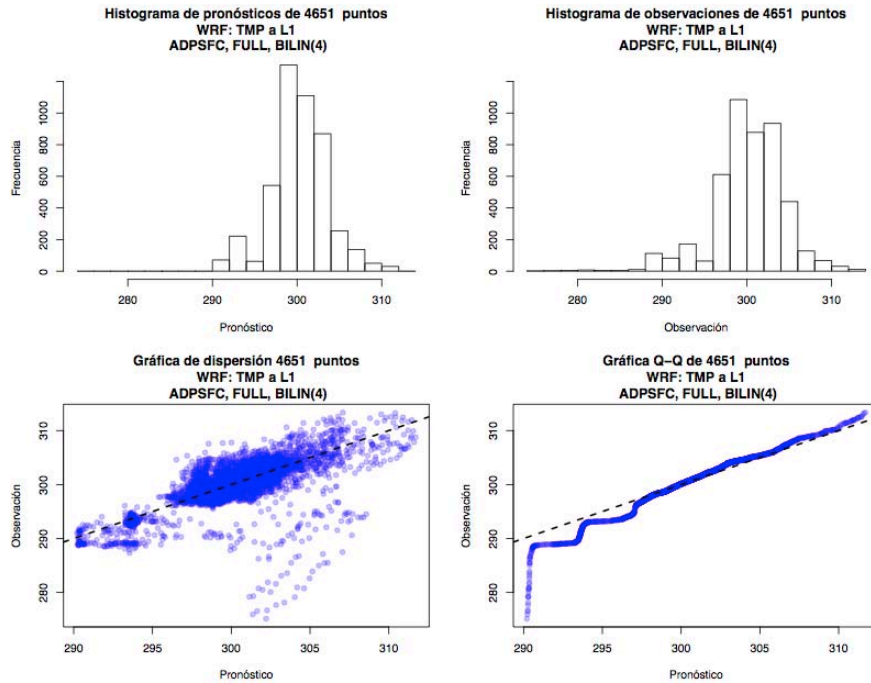


Figura 9.43 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en septiembre

### Componente U del viento

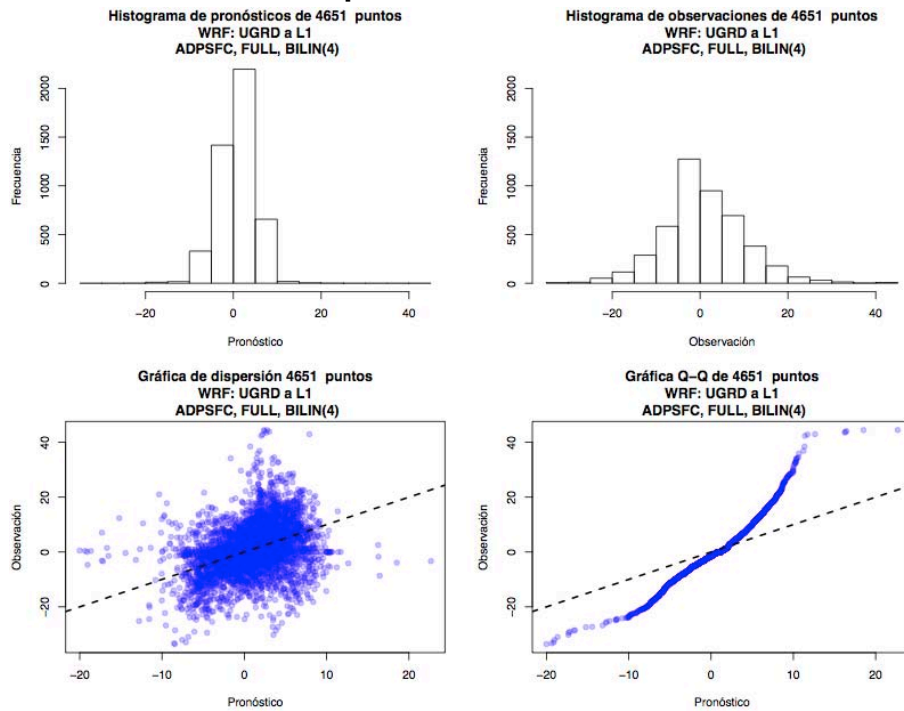
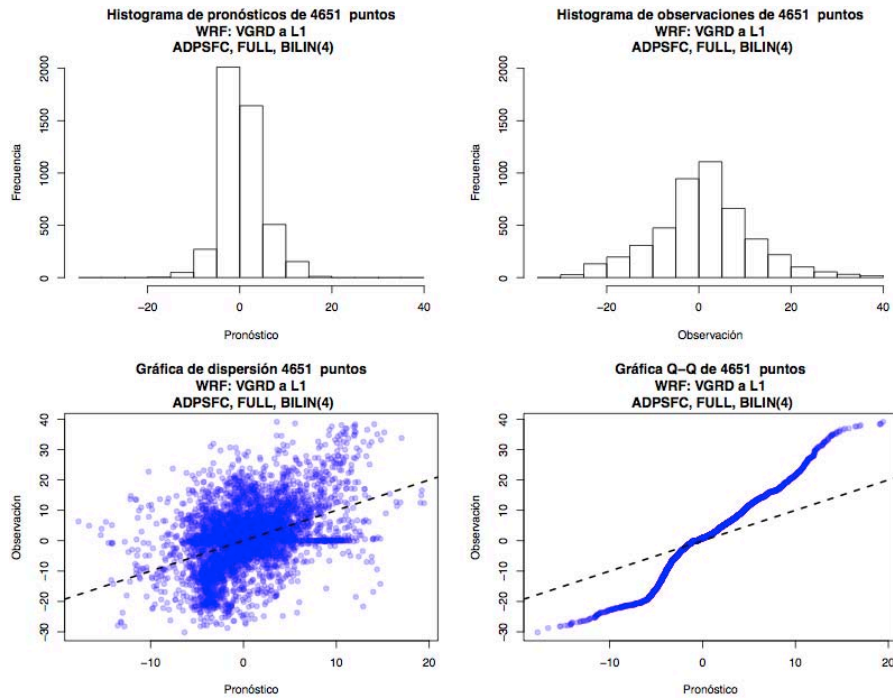


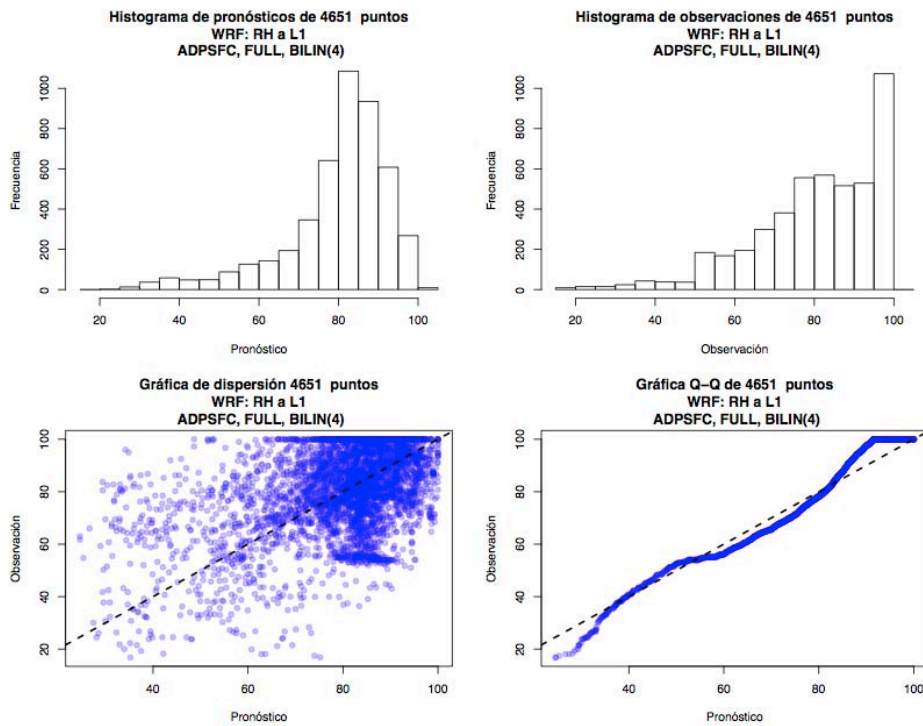
Figura 9.44 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en septiembre

## Componente V del viento



**Figura 9.45** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en septiembre

## Humedad relativa



**Figura 9.46** Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en septiembre

### 9.9.3 Noviembre

## Temperatura

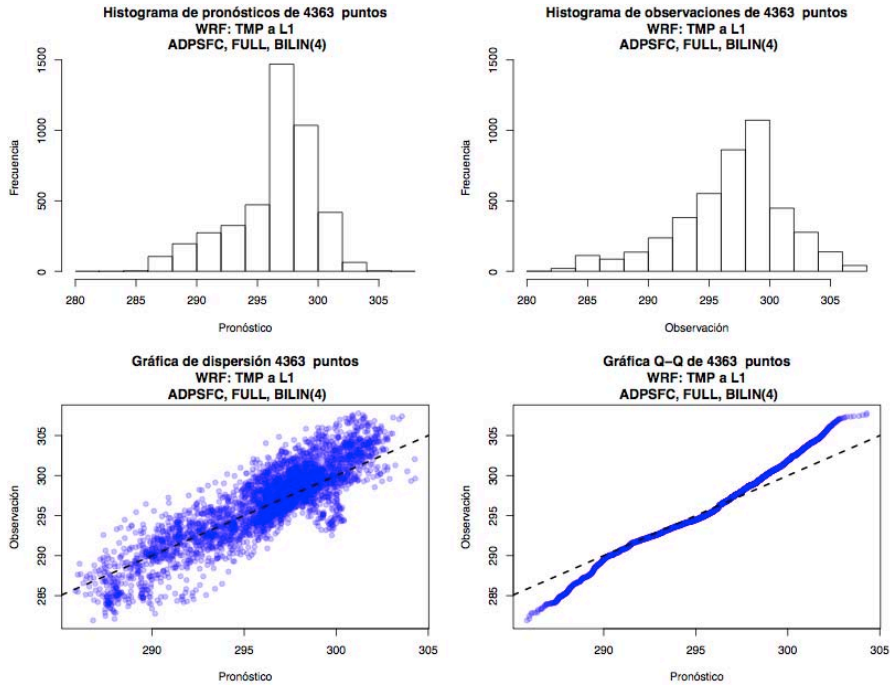


Figura 9.47 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la temperatura en noviembre

## Componente U del viento

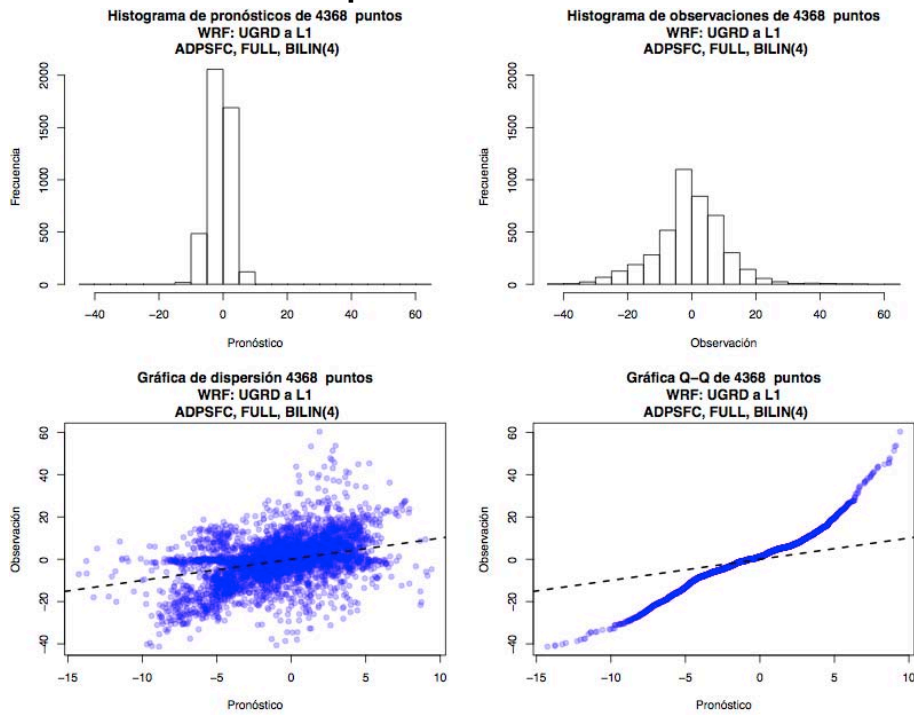


Figura 9.48 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente zonal del viento en noviembre



## Componente V del viento

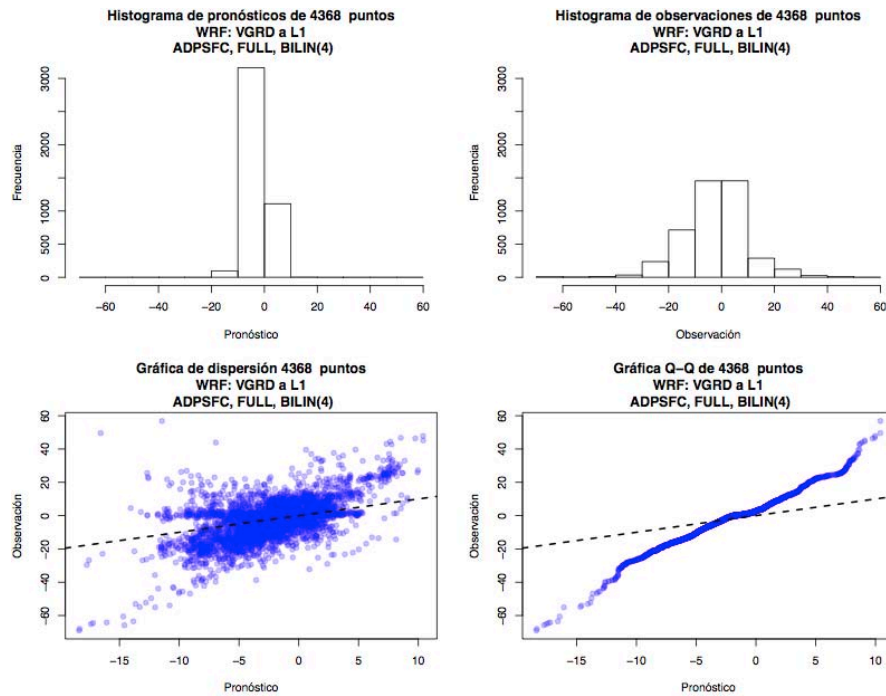


Figura 9.49 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la componente meridional del viento en noviembre

## Humedad relativa

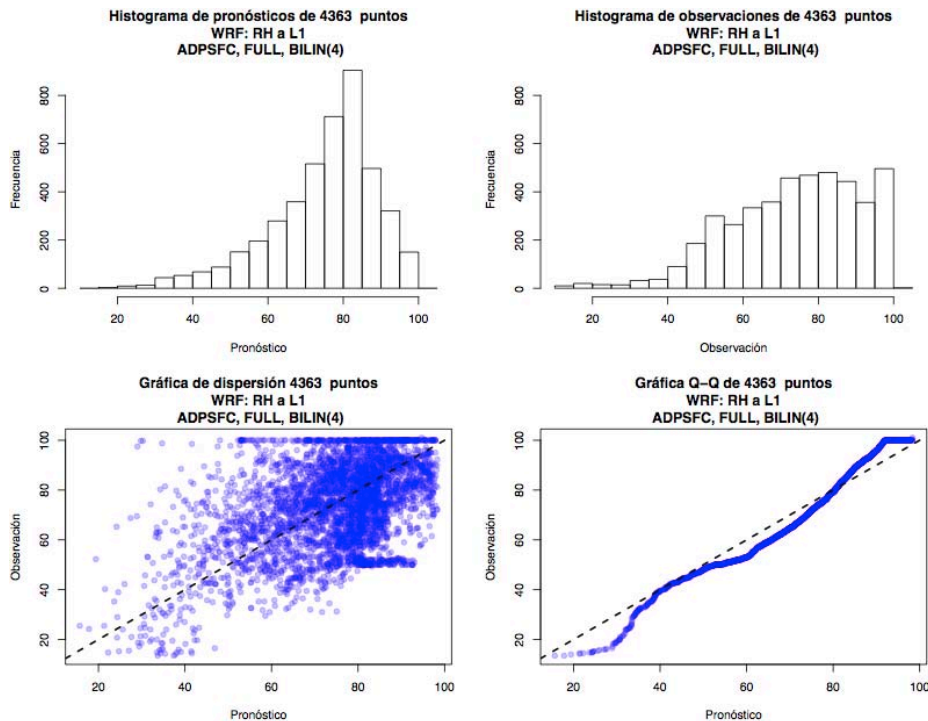
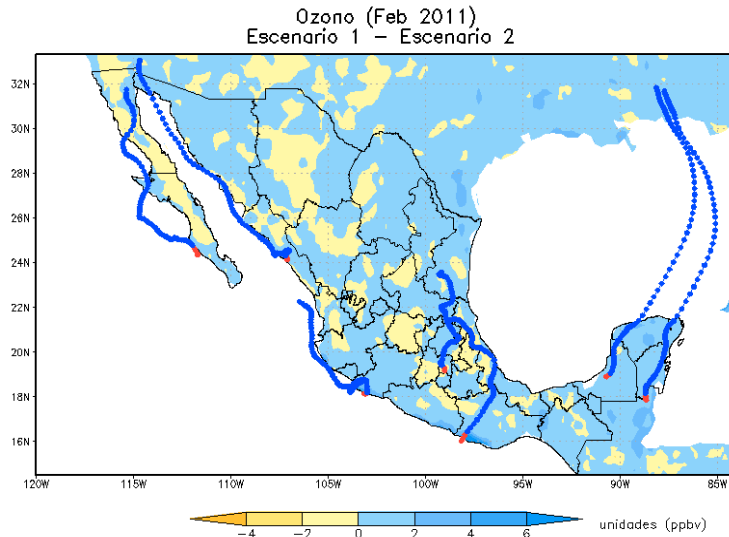


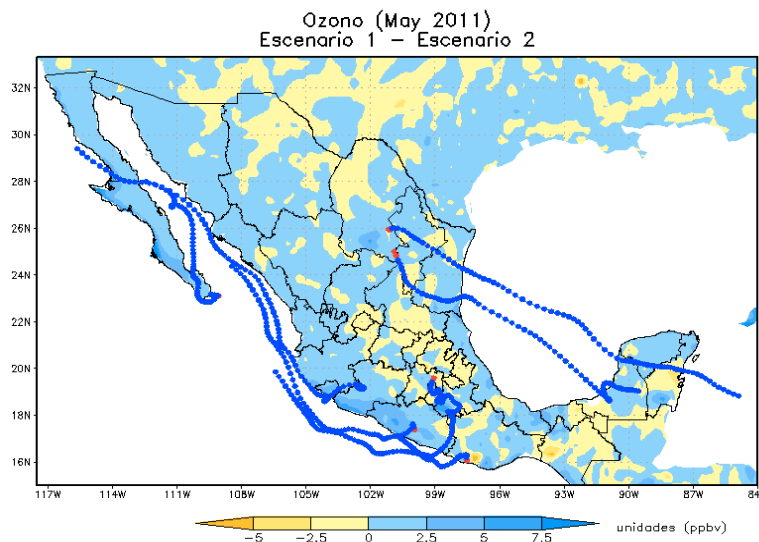
Figura 9.50 Comparaciones entre las observaciones de la base de datos SEMAR y los pronósticos para la humedad relativa en noviembre

## 9.10 Trayectorias



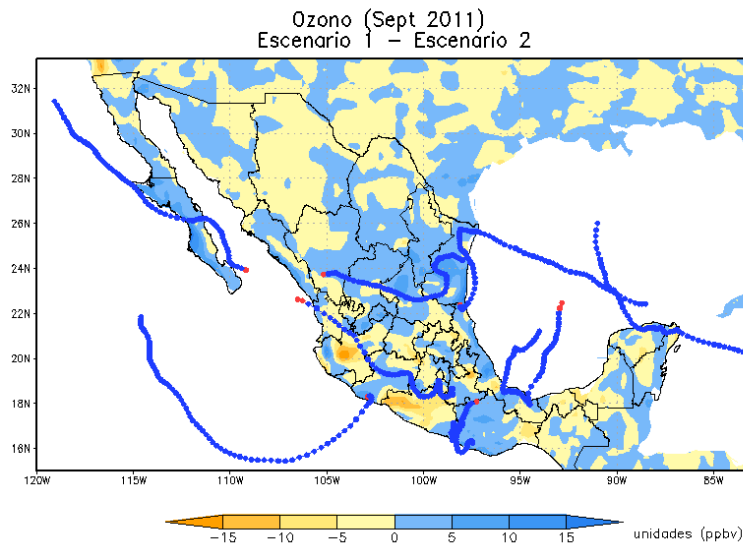
**Figura 9.51** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de febrero para el caso de ozono

En la figura 9.51 se observa el impacto de algunas parcelas de aire en el periodo de febrero para el caso del ozono sobre la península de Yucatán, las costas del sur del país y la península de Baja California Sur. Así también, se muestra las trayectorias algunas parcelas que llegan a la Cd. de México.



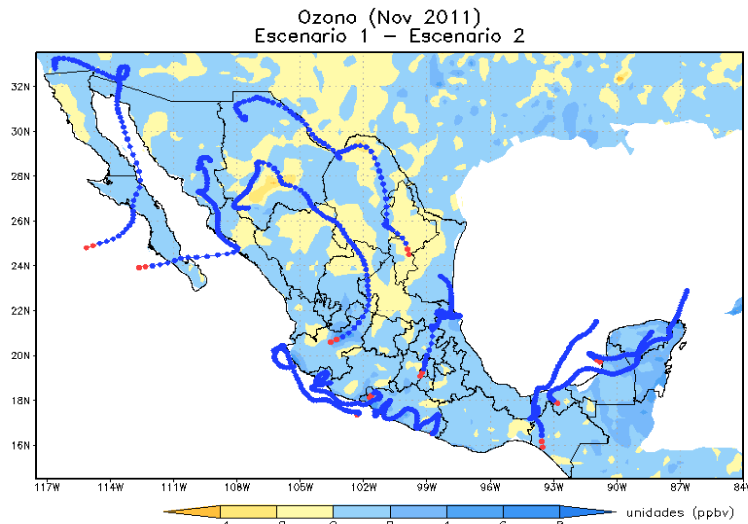
**Figura 9.52** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de mayo para el caso de ozono

En la figura 9.52 se muestran trayectorias de parcelas de aire para el periodo de mayo que provienen del mar para el caso del ozono y que impactan zonas costeras de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Asimismo parcelas que atraviesan las penínsulas de Baja California y Yucatán. Por ultimo puede observarse que algunas masas de aire que llegan a la Cd. de México provienen del mar.



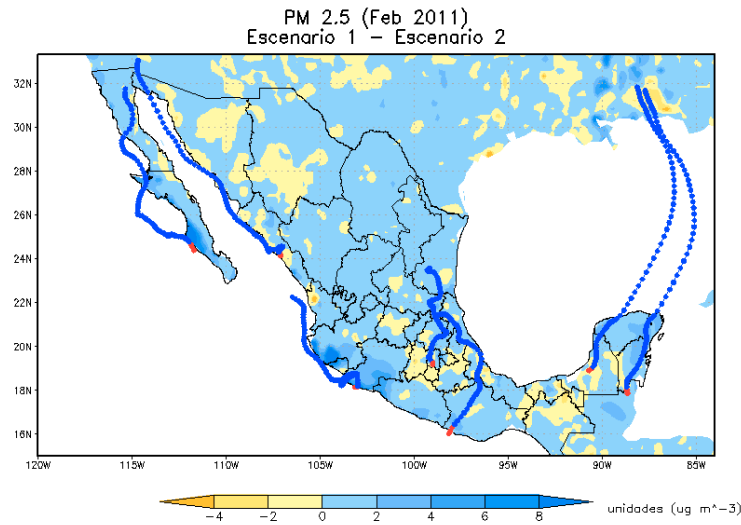
**Figura 9.53** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de septiembre para el caso de ozono

En la figura 9.53 se muestran trayectorias para el periodo de septiembre que provienen del mar para el caso del ozono y que impactan las costas de Michoacán, Oaxaca, Tamaulipas así como las penínsulas de Baja California y Yucatán. También se muestra que algunas parcelas que golpean la Cd. de México provienen del Océano Pacífico.



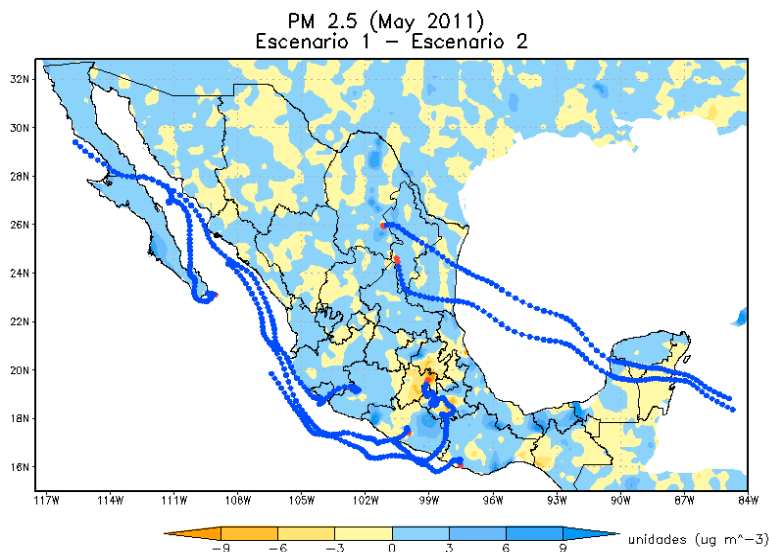
**Figura 9.54** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de noviembre para el caso de ozono

En la figura 9.54 se muestran las trayectorias de algunas parcelas de aire para el periodo de septiembre para el caso del ozono y que impactan el territorio mexicano en las costas del Pacífico y en la península de Yucatán. Asimismo se muestra la trayectoria de parcelas que provienen del norte y que impactan la Cd. de México.



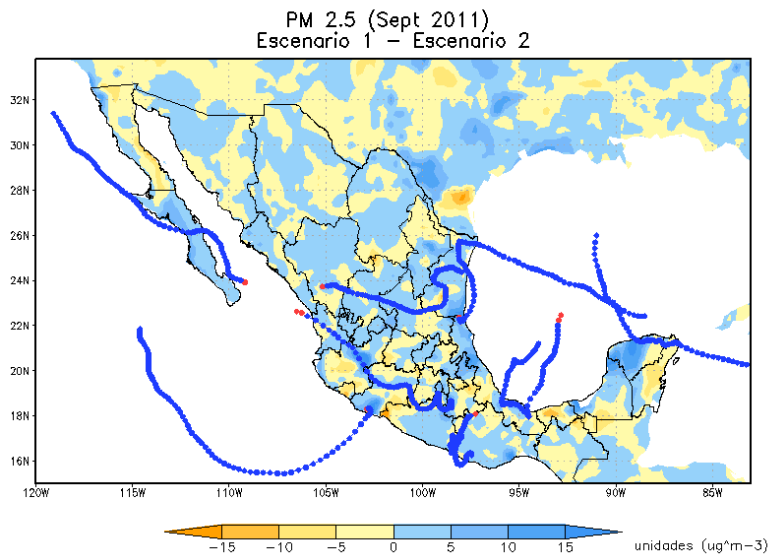
**Figura 9.55** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de febrero para el caso de  $PM_{2.5}$

En la figura 9.55 se observa el impacto de algunas parcelas de aire en el periodo de febrero para  $PM_{2.5}$  sobre la península de Yucatán, las costas del sur del país y la península de Baja California Sur. Así también, se muestra las trayectorias algunas parcelas que llegan a la Cd. de México.



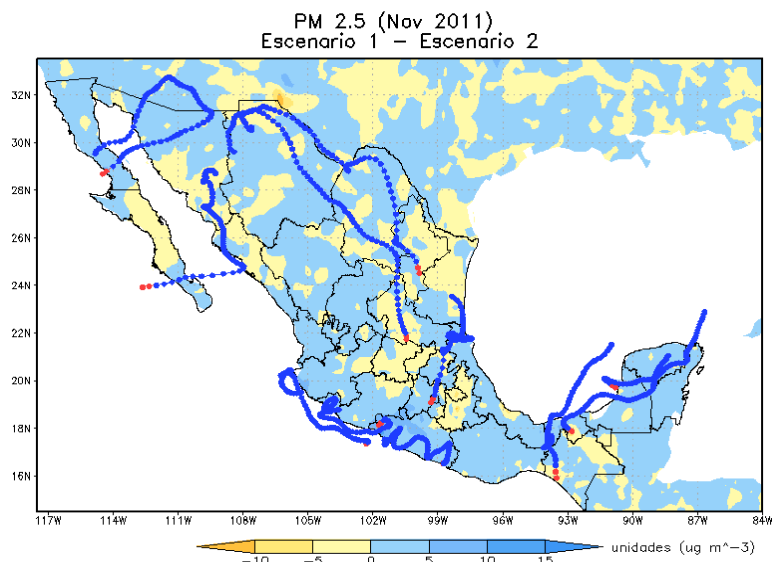
**Figura 9.56** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de mayo para el caso de  $PM_{2.5}$

En la figura 9.56 se muestran trayectorias de parcelas de aire para el periodo de mayo que provienen del mar para el caso de  $PM_{2.5}$  y que impactan zonas costeras de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Asimismo parcelas que atraviesan las penínsulas de Baja California y Yucatán. Por ultimo puede observarse que algunas masas de aire que llegan a la Cd. de México provienen del mar.



**Figura 9.57** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de septiembre para el caso de  $PM_{2.5}$

En la figura 9.57 se muestran trayectorias para el periodo de septiembre que provienen del mar para el caso de  $PM_{2.5}$  y que impactan las costas de Michoacán, Oaxaca, Tamaulipas así como las penínsulas de Baja California y Yucatán. También se muestra que algunas parcelas que golpean la Cd. de México provienen del Océano Pacífico.



**Figura 9.58** Trayectorias de parcelas de aire que impactan el interior del país dentro del periodo correspondiente a la semana de noviembre para el caso de  $PM_{2.5}$

En la figura 9.58 se muestran las trayectorias de algunas parcelas de aire para el periodo de septiembre para el caso de  $PM_{2.5}$  y que impactan el territorio mexicano en las costas del Pacífico y en la península de Yucatán. Asimismo se muestra la trayectoria de parcelas que provienen del norte y que impactan la Cd. de México.

## 9.11 Namelist.wps

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 1,
start_date = '2011-11-20_00:00:00','2011-01-16_12:00:00',
end_date = '2011-11-27_18:00:00','2011-01-16_12:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/
&geogrid
parent_id = 1, 1,
parent_grid_ratio = 1, 3,
i_parent_start = 1, 31,
j_parent_start = 1, 17,
e_we = 200, 112,
e_sn = 100, 97,
geog_data_res = '10m','2m',
dx = 27750,
dy = 27750,
map_proj = 'lambert',
ref_lat = 23.4,
ref_lon = -105.585,
truelat1 = 17.5 ,
truelat2 = 29.5 ,
stand_lon = -103.6133,
geog_data_path = '/home/fqa/agustin/geo'
opt_geogrid_tbl_path = '/home/fqa/agustin/WPS/geogrid'
/
&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/
&metgrid
fg_name = 'FILE'
io_form_metgrid = 2,
opt_metgrid_tbl_path = '/storage/fqa/agustin/WPS/metgrid'
```

## 9.12 Namelist.input

```
&time_control
run_days = 0,
run_hours = 186,
run_minutes = 0,
run_seconds = 0,
start_year = 2011, 2000, 2000,
start_month = 11, 01, 01,
```

```

start_day           = 20, 24, 24,
start_hour          = 00, 12, 12,
start_minute        = 00, 00, 00,
start_second        = 00, 00, 00,
end_year            = 2011, 2000, 2000,
end_month           = 11, 01, 01,
end_day             = 27, 25, 25,
end_hour            = 18, 12, 12,
end_minute          = 00, 00, 00,
end_second          = 00, 00, 00,
interval_seconds    = 21600
input_from_file     = .true.,.true.,.true.,
history_interval    = 60, 60, 60,
frames_per_outfile  = 1, 1000, 1000,
restart             = .false.,
restart_interval    = 14040,
io_form_history     = 2
io_form_restart     = 2
io_form_input       = 2
io_form_boundary    = 2
io_form_auxinput4   = 2
io_form_auxinput5   = 2
iofields_filename   = "ignore_vars.txt"
ignore_iofields_warning = .true.,
auxinput5_interval_m = 60, 60, 60
auxinput4_interval  = 360, 360, 360,
auxinput1_inname    = "met_em.d<domain>.<date>"
auxinput4_inname    = "wrfwinp_d<domain>"
auxinput5_inname    = "wrfchemin_d<domain>_<date>"

```

```

debug_level        = 0
/

```

#### &domains

```

eta_levels          = 1.000, 0.9975, 0.995, 0.992, 0.99,
                    0.98, 0.96, 0.91, 0.875, 0.85,
                    0.825, 0.8, 0.75, 0.7, 0.65,
                    0.6, 0.55, 0.5, 0.45, 0.4,
                    0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.16,
                    0.13, 0.1, 0.06, 0.03, 0.000,
time_step           = 120,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom             = 1,

```

```

e_we                = 200, 112, 94,
e_sn                 = 100, 97, 91,
e_vert              = 30, 30, 30,
p_top_requested     = 10000,

```

```

num_metgrid_levels      = 27,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                      = 27750, 10000, 3333.33,
dy                      = 27750, 10000, 3333.33,
grid_id                 = 1,  2,  3,
parent_id               = 0,  1,  2,
i_parent_start          = 1,  31, 30,
j_parent_start          = 1,  17, 30,
parent_grid_ratio       = 1,  3,  3,
parent_time_step_ratio  = 1,  3,  3,
feedback                = 1,
smooth_option           = 0
/

```

```

&physics
mp_physics              = 4,  3,  3,
ra_lw_physics           = 1,  1,  1,
ra_sw_physics           = 2,  1,  1,
radt                    = 30, 30, 30,
sf_sfclay_physics      = 1,  1,  1,
sf_surface_physics     = 2,  2,  2,
bl_pbl_physics          = 1,  1,  1,
bldt                    = 0,  0,  0,
cu_physics               = 5,  1,  0,
cu_diag                 = 1,  1,
cudt                    = 0,  5,  5,
sst_update              = 1
isfflx                  = 1,
ifsnow                  = 0,
icloud                  = 1,
surface_input_source    = 1,
num_soil_layers         = 4,
sf_urban_physics        = 0,  0,  0,
maxiens                 = 1,
maxens                  = 3,
maxens2                 = 3,
maxens3                 = 16,
ensdim                  = 144,
cu_rad_feedback         = .true. ,
/

```

```

&fdda
grid_fdda = 1,
gfdda_inname = "wrffdda_d<domain>",
gfdda_interval_m = 360,
gfdda_end_h = 744,
io_form_gfdda = 2,
/

```



```

&dynamics
rk_ord          = 3,
w_damping       = 0,
diff_opt        = 1,
km_opt          = 4,
diff_6th_opt    = 0, 0, 0,
diff_6th_factor = 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp       = 290.
iso_temp        = 0,
damp_opt        = 0,
zdamp           = 5000., 5000., 5000.,
dampcoef        = 0.2, 0.2, 0.2
khdif           = 0, 0, 0,
kvdif           = 0, 0, 0,
non_hydrostatic = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt   = 2, 1, 1,
scalar_adv_opt  = 2, 1, 1,
chem_adv_opt    = 2, 2, 0,
tke_adv_opt     = 2, 2, 0,
time_step_sound = 4, 4, 4,
h_mom_adv_order = 5, 5, 5,
v_mom_adv_order = 3, 3, 3,
h_sca_adv_order = 5, 5, 5,
v_sca_adv_order = 3, 3, 3,
/

```

```

&bdy_control
spec_bdy_width = 5,
spec_zone      = 1,
relax_zone     = 4,
specified      = .true., .false., .false.,
nested         = .false., .true., .true.,
/

```

```

&grib2
/

```

```

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/

```

```

&chem
kemit          = 8,
chem_opt       = 2,
bioemdt        = 30,
photdt         = 12,
chemdt         = 0,
io_style_emissions = 1,

```

```

emiss_opt           = 3,    3,
emiss_inpt_opt     = 1,    1,
emiss_opt           = 3,    3,
chem_in_opt        = 0,    0,
phot_opt           = 2,    2,
gas_drydep_opt     = 1,    1,
aer_drydep_opt     = 101,  1,
bio_emiss_opt      = 1,    1,
gas_bc_opt         = 1,    1,
gas_ic_opt         = 1,    1,
aer_bc_opt         = 1,    1,
aer_ic_opt         = 1,    1,
gaschem_onoff      = 1,    1,
aerchem_onoff      = 1,    1,
wetscav_onoff      = 0,    0,
cldchem_onoff      = 0,    0,
vertmix_onoff      = 1,    1,
chem_conv_tr       = 1,    1,
seas_opt           = 0,
dust_opt           = 0,
dmsemis_opt        = 0,
biomass_burn_opt   = 0,    0,
plumerisefire_frq = 30,    0,
have_bcs_chem      = .false., .false., .false.,
aer_ra_feedback    = 1,
opt_pars_out       = 1,
diagnostic_chem    = 2,
chemdiag           = 0,
/

```

### 9.13 Marpol\_stat\_analysis.sh

```

# Created by Agustin Garcia on 24/05/14.
#
#
echo
echo "**** Running Point-Stat on MARPOL WRF data ****"
# Se requiere de los archivos de pronostico
# de los archivos de datos observados
# del archivo de configuracion
#
# Calcula los estadisticos
#
set i = 0
set n = 1
set dia = ( 15 16 17 18 19 20 21 22 )
#set month = (08 09)

```

```

#set dia = ( 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
31 )
set DIRFCT=${PWD}/../data/marpol_mayo
set DIROBS=${PWD}/../data/201105

foreach day ($dia)
foreach itime (00 06 12 18)
  if( $i<10)then
    set file = ${DIRFCT}/WRFPRS_d01."0"$i
  else
    set file = ${DIRFCT}/WRFPRS_d01.$i
  endif
if( $n < 100) then
if ( $n<10) then
  set name=file_00${n}.log
else
  set name=file_0${n}.log
endif
else
set name=file_${n}.log
endif
echo $name" "gdas.81887.201105$day${itime}.nc
set obsf = $DIROBS/gdas.81887.201105$day${itime}.nc
../bin/point_stat \
$file \
$obsf \
./config/PointStatConfig_marpol2 \
-outdir ../out/point_stat -v 2 >& $name
@ i = $i + 6
@ n++
end
end
end

```

## 9.14 Marpol\_point\_stat\_semar.csh

```
#!/bin/csh
#
echo
echo "**** Running Point-Stat on MARPOL WRF data ****"
#
# Se requiere de los archivos de pronostico
# de los archivos de datos observados
# del archivo de configuracion
#
# Calcula los estadisticos
#
@ n = 1
set DIRFCT=${PWD}/../data/marpol_sept
set InFiles = (${DIRFCT}/WRFPRS_d01.?? ${DIRFCT}/WRFPRS_d01.???)
foreach file ($InFiles)
echo $file
if( $n < 10) then
    set name=file_0${n}.log
else
    set name=file_${n}.log
endif
../bin/point_stat \
$file \
../out/ascii2nc/semar_ago2011.nc \
./config/PointStatConfig_marpol_semar \
-outdir ../out/point_stat -v 2 >& $name
    @ n++
end
```

## 9.15 Script en Cshell para la extracción de variables de las salidas del WRF usando NetCDF Operators

```
#!/bin/csh
#
# Extrae la variable O3 de los archivos de salida para base de archivos perdidos
#
set fsal=(/storage/fqa/aidee/DOMAINS/marpol/data/nov_sinbuques/wrfout_d01_2011*)
@ n = 1
foreach file ($fsal)
if ($n<100) then
    set name=0$n
    if ($n<10) then
        set name=00$n
    endif
else
    set name=$n
endif
```

```

endif
  echo $name
ncks -v o3,so2,PM2_5_DRY $file salida_mar_bas$name
  @ n++
end

ncra -y max salida_mar_base* maximo_septiembre_sinb.nc

rm sal*.nc

```

### 9.16 Programa en C shell para extraer variables usando read\_wrf

```

#!/bin/csh

# estraee_sup.csh
#
#
# Created by Gilberto Maldonado on 27/02/15.
#

set month =( febrero mayo septiembre noviembre )
foreach mes ($month)
setenv DIR ../con_buques_01/$mes

cd $DIR

set Estacion =( DF )

set InFiles = (wrfout_d01_2011-*)

cd ../../superficie

foreach est ($Estacion)
foreach FILE ($InFiles)
echo $FILE
switch ( $est )
  case DF:
    ./read_wrf -ts ll 19.42867 -99.109126 o3 PM2_5_DRY so2 no2 co -lev 1 $DIR/$FILE >sal
    breaksw
  default
echo "Why did you choose $est?"
endsw
end
mv TIME_SERIES.out $est-$mes.txt
end # estaciones
end # meses

```

## 9.17 Programa en FORTRAN para modificar las emisiones marítimas

```
!  
! suma.f90  
!  
!  
! Created by Agustin Garcia on 25/03/14.  
! Copyright 2014 UNAM. All rights reserved.  
!  
! Transforms CB mechanism to RADM2  
! by  
! a) read netcdf files from Mexico National Emissions Inventory (NEI)  
! b) reads mexican and US data sum both  
! c) generates a sigle file with both emissions  
! Zavery and Peters 1999  
! Metanol es 0.4020 HC3 RADM2  
! Etanol es 1.198 HC3 RADM2  
! HC3 = PAR/0.6061 x 0.0495 = 0.0804 PAR  
! HC5 = PAR/0.6061 x 0.0327 = 0.05395 PAR  
! HC8 = PAR/0.6061 x 0.0233 = 0.0384 PAR  
! 29/sep/2014 :  
! Popocatepetl emissions are included 19.023 -98.622  
! Colima emissions 19.5615 -103.6162  
! Reference Atmos. Chem. Phys., 8, 6655–6663, 2008  
! SO2 emissions from Popocatépetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote  
sensing techniques  
!  
module vars  
! character  
! n_cbm number of chemical varialbes in CBM  
integer nVar, ntime  
integer nx,ny,nl ,radm,nf ,cbmz  
parameter (nx= 199,ny=99,nl=8)  
parameter (nVar=32,ntime=25,radm=nVar)  
parameter(cbmz= 36)  
REAL, ALLOCATABLE :: cbm_vars_us(:,:,:) :  
REAL, ALLOCATABLE :: cbm_vars_mx(:,:,:) :  
real e_mex(nx,ny,nl),e_us(nx,ny,1)  
real e_sum(nx,ny,nl,cbmz,ntime)  
real luse(nx,ny,1)  
real xLAT(nx,ny),xlon(nx,ny)  
integer, ALLOCATABLE :: RecordDimID(:),Records(:),numdims(:),numAtts(:)  
integer,dimension(cbmz):: exist  
integer ncfiler_us, ncfiler_mx, ncfiler_mx2  
integer nDims, nGlobalAtts, unlimdimid,nVars  
integer zlev  
character (len=4):: cday,mecha  
character (len=8)::cname(nVar),cnamf(cbmz)  
character(len=20)::current_date,TIT  
common /ncfile/ ncfiler_us, ncfiler_mx, ncfiler_mx2, Dims,nVars,nGlobalAtts, unlimdimid
```

```
common /varss/ e_mex,e_us,e_sum,zlev,luse,current_date,TIT,cday,mecha
common /cvars/ cname,cnamf,cfile,cfile2
```

```
end module vars
```

```
program convert
```

```
use netcdf
```

```
use vars
```

```
USE IFPORT
```

```
!
```

```
  call ncf_read
```

```
  call guarda
```

```
contains
```

```
subroutine ncf_read
```

```
  implicit none
```

```
  integer i,j,k,it
```

```
  integer ii,jj,kk
```

```
  real dum(nx,ny,nl)
```

```
  i=system('clear')
```

```
  print *, "Reading input: mex1, mex2 and usa files"
```

```
  cname( 1)="E_NO2  "
```

```
  cname( 2)="E_NO   "
```

```
  cname( 3)="E_CO   "
```

```
  cname( 4)="E_SO2  "
```

```
  cname( 5)="E_NH3  "
```

```
  cname( 6)="E_ALD  "
```

```
  cname( 7)="E_HC3  "
```

```
  cname( 8)="E_HC5  "
```

```
  cname( 9)="E_HC8  "
```

```
  cname(10)="E_ETH  "
```

```
  cname(11)="E_HCHO "
```

```
  cname(12)="E_ISO  "
```

```
  cname(13)="E_KET  "
```

```
  cname(14)="E_XYL  "
```

```
  cname(15)="E_OL2  "
```

```
  cname(16)="E_OLT  "
```

```
  cname(17)="E_OLI  "
```

```
  cname(18)="E_TOL  "
```

```
  cname(19)="E_CSL  "
```

```
  cname(20)="E_ORA2 "
```

```
  cname(21)="E_PM25I "
```

```
  cname(22)="E_PM25J "
```

```
  cname(23)="E_PM25  "
```

```
  cname(24)="E_PM_10 "
```

```
  cname(25)="E_SO4I "
```

```
  cname(26)="E_SO4J "
```

```
  cname(27)="E_ORGI "
```

cname(28)="E\_ORGJ "  
cname(29)="E\_ECI "  
cname(30)="E\_ECJ "  
cname(31)="E\_NO3I "  
cname(32)="E\_NO3J "

cnamf( 1)="E\_NO2 "  
cnamf( 2)="E\_NO "  
cnamf( 3)="E\_CO "  
cnamf( 4)="E\_SO2 "  
cnamf( 5)="E\_NH3 "  
cnamf( 6)="E\_ALD "  
cnamf( 7)="E\_HC3 "  
cnamf( 8)="E\_HC5 "  
cnamf( 9)="E\_HC8 "  
cnamf(10)="E\_ETH "  
cnamf(11)="E\_HCHO "  
cnamf(12)="E\_ISO "  
cnamf(13)="E\_KET "  
cnamf(14)="E\_XYL "  
cnamf(15)="E\_OL2 "  
cnamf(16)="E\_OLT "  
cnamf(17)="E\_OLI "  
cnamf(18)="E\_TOL "  
cnamf(19)="E\_CSL "  
cnamf(20)="E\_ORA2 "  
cnamf(21)="E\_PM25I "  
cnamf(22)="E\_PM25J "  
cnamf(23)="E\_PM25 "  
cnamf(24)="E\_PM\_10 "  
cnamf(25)="E\_SO4I "  
cnamf(26)="E\_SO4J "  
cnamf(27)="E\_ORGI "  
cnamf(28)="E\_ORGJ "  
cnamf(29)="E\_ECI "  
cnamf(30)="E\_ECJ "  
cnamf(31)="E\_NO3I "  
cnamf(32)="E\_NO3J "  
cnamf(33)="E\_ECC "  
cnamf(34)="E\_NO3C "  
cnamf(35)="E\_C2H5OH"  
cnamf(36)="E\_CH3OH "

exist( 1)=2  
exist( 2)=2  
exist( 3)=2  
exist( 4)=2  
exist( 5)=2  
exist( 6)=2



```

exist( 7)=2! HC3
exist( 8)=2
exist( 9)=2
exist(10)=2
exist(11)=2
exist(12)=2
exist(13)=2
exist(14)=2
exist(15)=2
exist(16)=2
exist(17)=2
exist(18)=2
exist(19)=2
exist(20)=2
exist(21)=2
exist(22)=2
exist(23)=1 !PM2.5
exist(24)=1 !PM10
exist(25)=2
exist(26)=2
exist(27)=2
exist(28)=2
exist(29)=2
exist(30)=2
exist(31)=1
exist(32)=2
exist(33)=3! 'E_ECC '
exist(34)=3! 'E_NO3C '
exist(35)=3 !E_C2H5OH
exist(36)=3 !E_CH3OH

```

```
e_sum=0
```

```
call extract("geo_em.d01.nc","LU_INDEX",nx,ny,1,1,luse)
```

```

do j=1,cbmz !var data
do it=1,24
  if(exist(j).eq.1.or.exist(j).eq.2) then
    !print *,'mex1',j,cname(j)
    if(it.le.12) then
      call extract("mex1",cname(j),nx,ny,nl,it,e_mex)
    else
      call extract("mex2",cname(j),nx,ny,nl,it-12,e_mex)
    end if
    call suma(j,it,e_mex,nx,ny,nl)
  end if
  if(exist(j).eq.2.or.exist(j).eq.3) then
    !print *,j,'usa ',cnamf(j)
    call extract("usa",cnamf(j),nx,ny,1,it,e_us)
  end if
end do
end do

```

```

e_us=e_us/770.06
if (j.eq.8) then
  e_us=e_us*0.0804 !HC3
  call suma(7,it,e_us,nx,ny,1)
  e_us=e_us*0.05395/0.0804 !HC5
  call suma(8,it,e_us,nx,ny,1)
  e_us=e_us*0.0384/0.05395 !HC8
  call suma(9,it,e_us,nx,ny,1)
else if(j.eq.1) then
  call suma(2,it,e_us,nx,ny,1)
else if(j.ge.20 .and. j.le.33) then
  e_us=e_us/3600
  call suma(j,it,e_us,nx,ny,1)
else
  call suma(j,it,e_us,nx,ny,1)
end if
end if
if (j.eq.35) then
  e_us=e_us*1.198
  call suma(7,it,e_us,nx,ny,1)
  ! print *, 'C2H5OH'
end if
if (j.eq.36) then
  e_us=e_us*0.4020
  call suma(7,it,e_us,nx,ny,1)
  !print *,it,'CH3OH'
end if
end do ! it
end do ! variable
call extract("mex1", "XLAT  ",nx,ny,1,1,xlat)
call extract("mex1", "XLONG  ",nx,ny,1,1,xlon)
zlev=nl
do i=1,nx-1
  do j=1,ny-1
    if(xlat(i,j).le.19.025.and. xlat(i,j+1).ge.19.025 .and. &
      & xlon(i,j).le.-98.622.and. xlon(i+1,j).ge.-98.622) then
      do it=1,24
        e_sum(i,j+1,6,4,it)= 71*0.7 !Popocatepetl mol/h/km2
        e_sum(i,j+1,7,4,it)= 350*0.7 !Popocatepetl mol/h/km2
        e_sum(i,j+1,8,4,it)= 1650*0.7 !Popocatepetl mol/h/km2
        e_sum(i,j,6,4,it)= 71*0.3 !Popocatepetl mol/h/km2
        e_sum(i,j,7,4,it)= 350*0.3 !Popocatepetl mol/h/km2
        e_sum(i,j,8,4,it)= 1650*0.3 !Popocatepetl mol/h/km2
      end do
    end if
    if(xlat(i,j).le.19.5615.and. xlat(i,j+1).ge.19.5615 .and. &
      & xlon(i,j).le.-103.6162.and. xlon(i+1,j).ge.-103.6162) then
      do it=1,24
        e_sum(i,j,6,4,it)= 10 !Colima mol/h/km2

```

```

        e_sum(i,j,7,4,it)= 100!Colima mol/h/km2
        e_sum(i,j,8,4,it)= 703 !Colima mol/h/km2
    end do
    end if
    end do
    end do
    print *,"Done Reading"
end subroutine ncf_read
!
```

```

subroutine handle_err(status)
integer, intent ( in) :: status
```

```

if(status /= nf90_noerr) then
print *, trim(nf90_strerror(status))
stop "Stopped"
end if
end subroutine handle_err
```

```

!
!
```

```

subroutine extract(cfile,cnam,nx,ny,ilev,nrec,array)
implicit none
character*(*) cfile
character(len=8) cnam
character*19 name
! Dimensions nd time NREC
integer NDIMS,NREC
parameter (NDIMS =4)
integer nx,ny,ilev,dimid
integer start(NDIMS),count(NDIMS),dimids(NDIMS)
integer var_id
integer ncid
integer xtype,natts,NDIM2,i,len,j
! Error handling
integer retval
! Data array
real array(NX,NY,ilev)
! Open the file
retval= nf90_open(cfile,NF90_NOWRITE,ncid)
if (retval .ne. nf90_noerr) call handle_err(retval)
! Get the varids of the variable cname from netCDF file ncid.
retval = nf90_inq_varid(ncid, cnam, var_id)
if (retval .ne. nf90_noerr) call handle_err(retval)
! print *,cnam,NX,NY,ilev,NREC
! Read 1 record of NX*NY*ILEV values, starting at the
! beginning of the record (array (1, 1, 1, rec) element in the netCDF
! file).
count(1) = NX
```

```

count(2) = NY
count(3) = ILEV
count(4) = 1
start(1) = 1
start(2) = 1
start(3) = 1
zlev=ILEV
! Read the variable data from file, at record NREC
start(4)=nrec

retval= nf90_get_att(ncid,NF90_GLOBAL,"TITLE",TIT)

retval= nf90_get_var(ncid, var_id,array, start=start,count=count)
if (retval .ne. nf90_noerr) call handle_err(retval)
! Close the file. This frees up any internal netCDF resources
! associated with the file.
retval = nf90_close(ncid)
if (retval .ne. nf90_noerr) call handle_err(retval)
! If we got this far, everything worked as expected. Yipee!
!print *, '*** SUCCESS reading ',cfile,TIT
end subroutine
!
!
subroutine suma(ivar,time,array,ix,iy,il)
  real array(ix,iy,il)
  integer ivar,time
  integer i,j,k
  do i=1,ix
    do j=1,iy
      do k= 1,il
        if(luse(i,j,1).eq.16.and.k.eq.2)then
          e_sum(i,j,k,ivar,time)= e_sum(i,j,k,ivar,time)+ 0
        else
          e_sum(i,j,k,ivar,time)= e_sum(i,j,k,ivar,time)+array(i,j,k)
        endif
      end do
    end do
  end do
  return
end subroutine
!
!
!
subroutine guarda
  IMPLICIT NONE
  integer :: NDIMS
  parameter (NDIMS=6)
  integer :: i,j,k,l
  integer :: ncid

```

```

integer :: periodo,iit,eit,it
integer :: ikk
integer :: dimids2(2),dimids3(3),dimids4(4)
integer,dimension(radm+1):: id_var
integer :: id_varlong,id_varlat
integer :: id,iu
integer :: isp(radm)
integer,dimension(NDIMS):: dim,id_dim
real,ALLOCATABLE :: ea(:,,:,:)
character (len=19),dimension(NDIMS) ::sdim
character(len=39):: FILE_NAME
character(len=19),dimension(1,1)::Times
character(len=19):: iTime
character(8) :: date
character(10) :: time
character(len=20)::ename(radm)
character(21) :: hoy
DATA isp / 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10, &
11,12,13,14,15, 16,17,18,19,20, &
21,22,23,24,25, 26,27,28,29,30, &
31,32/

data sdim /"Time          ", "DateStrLen      ", "west_east      ", &
& "south_north      ", "bottom_top     ", "emissions_zdim_stag"/

data ename /&
& 'Nitrogen Dioxide ', 'Nitrogen Oxide ', 'Carbon Monoxide ', &
& 'Sulfur Dioxide ', 'Ammonia gas ', 'Acetaldehyde ', &
& 'Alkane HC3 ', 'Alkane HC5 ', 'Alkane HC8 ', &
& 'Ethane ', 'Formaldehyde ', 'Isoprene ', &
& 'Ketones ', 'Xylenes ', 'Ethene ', &
& 'Terminal alkenes ', 'Internal alkenes ', 'Toluene & less react', &
& 'Cresol and other hyd', 'Acetic Acid & others', 'PM2.5 nuclei mode ', &
& 'PM2.5 accumulat mode', 'PM2.5 dry mass ', 'Unspeciate Prim PM10', &
& 'SulfatePM25nucleiMod', 'Sulfate PM2.5 accumu', 'OrganicPM2.5nucleiMd', &
& 'Organic PM2.5 accumu', 'ElementalCarbonPM2.5', 'EC PM2.5 Accum mode ', &
& 'Nitrate PM2.5 nuclei', 'Nitrate PM2.5 accumu'/
print *, "Guarda Archivo"
! *****
call date_and_time(date,time)
write(hoy,'(A4,"-"A2,"-"A2,x,A2,":"A2,"-"A4)')&
date(1:4),date(5:6),date(7:8),time(1:2),time(3:4),time(5:8)
print *, hoy
current_date='2011-01-01_00:00:00'
cday='lun'
mecha='RADM'
!write(current_date(4:4),'(A1)')char(6+48)
do periodo=1,2
  if(periodo.eq.1) then

```

```

FILE_NAME='wrfchemi.d01.radm2.//current_date(1:19)      !*****
iit= 0
eit= 11
iTime=current_date
else if(periodo.eq.2) then
iit=12
eit=23
write(iTime(12:13),'(I2)') iit
FILE_NAME='wrfchemi.d01.radm2.//iTime
end if
! Open NETCDF emissions file
call check( nf90_create(FILE_NAME, nf90_clobber, ncid) )
!   Define dimensiones
dim(1)=1
dim(2)=19
dim(3)=nx
dim(4)=ny
dim(5)=1!mkx
dim(6)=zlev! !8
!print *, "zlev", zlev
if(.not.ALLOCATED(ea)) allocate (ea(dim(3),dim(4),dim(6),dim(1)))
call check( nf90_def_dim(ncid,sdim(1), NF90_UNLIMITED, id_dim(1)) )
do i=2,NDIMS
call check( nf90_def_dim(ncid, sdim(i), dim(i), id_dim(i)) )
end do

dimids2 = (/id_dim(2),id_dim(1)/)
dimids3 = (/id_dim(3),id_dim(2),id_dim(1) /)
dimids4 = (/id_dim(3),id_dim(4),id_dim(6),id_dim(1)/)

!Atributos Globales NF90_GLOBAL
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "TITLE",trim(TIT)/" Area US, Mexico and Central
America"))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "START_DATE",iTime))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "DAY ",cday))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "SIMULATION_START_DATE",iTime))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "WEST-EAST_GRID_DIMENSION",nx))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "SOUTH-NORTH_GRID_DIMENSION",ny))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "BOTTOM-TOP_GRID_DIMENSION",1))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "DX",27750.))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "DY",27750.))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "CEN_LAT",23.4))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "CEN_LON",-105.585))
! call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "CEN_LAT",(MAXVAL(xlat)+MINVAL(xlat))/2))
! call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "CEN_LON",(MAXVAL(xlon)+MINVAL(xlon))/2))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "TRUELAT1",17.5))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "TRUELAT2",29.5))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "MOAD_CEN_LAT",23.4))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "STAND_LON",-103.6133))

```

```

call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "POLE_LAT",90.))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "POLE_LON",0.))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "GRIDTYPE","C"))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "GMT",12.))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "JULYR",2011))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "JULDAY",140))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "MAP_PROJ",1))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "MMINLU","USGS"))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "MECHANISM",mecha))
call check( nf90_put_att(ncid, NF90_GLOBAL, "CREATION_DATE",hoy))

```

! Define las variables

```

call check( nf90_def_var(ncid, "Times", NF90_CHAR, dimids2,id_var(radm+1) ) )
! Atributos para cada variable
call check( nf90_def_var(ncid, "XLONG", NF90_REAL,(/id_dim(3),id_dim(4),id_dim(1)/),id_varlong ) )
! Assign attributes
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlong, "FieldType", 104 ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlong, "MemoryOrder", "XYZ" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlong, "description", "LONGITUDE, WEST IS NEGATIVE" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlong, "units", "degree_east"))
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlong, "axis", "X" ) )
call check( nf90_def_var(ncid, "XLAT", NF90_REAL,(/id_dim(3),id_dim(4),id_dim(1)/),id_varlat ) )
! Assign attributes
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlat, "FieldType", 104 ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlat, "MemoryOrder", "XYZ" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlat, "description", "LATITUDE, SOUTH IS NEGATIVE" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlat, "units", "degree_north"))
call check( nf90_put_att(ncid, id_varlat, "axis", "Y" ) )
do i=1,radm
  if(i.lt.21 ) then
    call crea_attr(ncid,4,dimids4,cname(i),ename(i),id_var(i))
  else
    call crea_attr2(ncid,4,dimids4,cname(i),ename(i),id_var(i))
  end if
end do
!
! Terminan definiciones
call check( nf90_enddef(ncid) )
!
! Inicia loop de tiempo
tiempo: do it=iit,eit
write(6,'(A,x,I3)')TIEMPO: ', it
gases: do ikk=1,radm
  ea=0.0
  if(ikk.eq.1) then
    if (it.lt.10) then
      write(current_date(13:13),'(A1)')char(it+48)
    else

```

```

        id = int((it)/10)+48 ! Decenas
        iu = it-10*int((it)/10)+48 ! unidades
        write(current_date(12:13),'(A1,A1)'char(id),char(iu)
    end if
    Times(1,1)=current_date(1:19)
    if (periodo.eq. 1) then
        call check( nf90_put_var(ncid,id_var(radm+1),Times,start=(/1,it+1/)) )
        call check( nf90_put_var(ncid, id_varlong,xlon,start=(/1,1,it+1/)) )
        call check( nf90_put_var(ncid, id_varlat,xlat,start=(/1,1,it+1/)) )
    else
        call check( nf90_put_var(ncid,id_var(radm+1),Times,start=(/1,it-11/)) )
        call check( nf90_put_var(ncid, id_varlong,xlon,start=(/1,1,it-11/)) )
        call check( nf90_put_var(ncid, id_varlat,xlat,start=(/1,1,it-11/)) )
    endif
end if ! for kk == 1
do i=1, nx
    do j=1, ny
        do l=1,zlev
            ea(i,j,l,1)=e_sum(i,j,l,ikk,it+1)
        end do
    end do
end do
if(periodo.eq.1) then
    call check( nf90_put_var(ncid, id_var(isp(ikk)),ea,start=(/1,1,1,it+1/)) )
else
    call check( nf90_put_var(ncid, id_var(isp(ikk)),ea,start=(/1,1,1,it-11/)) ) !*****
endif
end do gases
end do tiempo
call check( nf90_close(ncid) )
end do !periodo
deallocate(ea)

end subroutine guarda

subroutine check(status)
integer, intent ( in) :: status
if(status /= nf90_noerr) then
print *, trim(nf90_strerror(status))
stop 2
end if
end subroutine check
! CCC RRRR EEEEE A A TTTT TTTT RRRR
! C R RRE AA AA T T R RR
! C RRRR EEEE AAAAA AAAAA T T RRRR
! C R R E A A A A T T R R
! CCC R R EEEEE A A__A A T T R R
subroutine crea_attr(ncid,idm,dimids,svar,cname,id_var)
use netcdf

```



```

implicit none
integer , INTENT(IN) ::ncid,idm
integer, INTENT(out) :: id_var
integer, INTENT(IN),dimension(idm):: dimids
character(len=*), INTENT(IN)::svar,cname
character(len=60) :: cvar
cvar="Emissions rate of "//trim(cname)

call check( nf90_def_var(ncid, svar, NF90_REAL, dimids,id_var ) )
! Assign attributes
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "FieldType", 104 ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "MemoryOrder", "XYZ" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "description", Cvar ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "units", "mol km^-2 hr^-1") )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "stagger", "Z" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "coordinates", "XLONG XLAT" ) )
! print *, "Entro a Atributos de variable",dimids,id,jd
return
end subroutine crea_attr
! CCC RRRR EEEEE A A TTTTT TTTTT RRRR 222
! C R RRE AA AA T T R RR 2 2
! C RRRR EEEE AAAAA AAAAA T T RRRR 2
! C R R E A A A A T T R R 2
! CCC R R EEEEE A A ___A A T T R R 22222
subroutine crea_attr2(ncid,idm,dimids,svar,cname,id_var)
use netcdf
implicit none
integer, INTENT(IN) ::ncid,idm
integer, INTENT(out) :: id_var
integer,INTENT(IN) ,dimension(idm):: dimids
character(len=*),INTENT(IN) ::svar,cname
character(len=50) :: cvar
cvar="EMISSIONS RATE OF "//trim(cname)
call check( nf90_def_var(ncid, svar, NF90_REAL, dimids,id_var ) )
! Assign attributes
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "FieldType", 104 ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "MemoryOrder", "XYZ" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "description",cvar ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "units", "ug m-2 s-1") )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "stagger", "Z" ) )
call check( nf90_put_att(ncid, id_var, "coordinates", "XLONG XLAT" ) )
! print *, "Entro a Atributos de variable",dimids,id,jd
return
end subroutine crea_attr2

end program

```