

03060



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO DE LOS
HURACANES CERCANOS A MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)
P R E S E N T A :
Arturo Caracas Uribe

Director de tesis:

Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda

México, D. F.

2005

m343640



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.

Agradecimientos

Quisiera antes que nada dar gracias a Dios por su fuerza y sabiduría, y por la maravillosa vida que me ha dado. Mi total y sincero agradecimiento al Doctor Víctor Orlando Magaña Rueda, por su dirección en los últimos años que me ha permitido llevar a buen término esta importante etapa de mi vida. Al Doctor Ernesto Caetano, por su accesibilidad y buena disposición para aclarar mis dudas en todo momento. A los Doctores: Tomás Morales Acoltzi, Artemio Gallegos García, Jorge Zavala Hidalgo y Ricardo Prieto González, por sus valiosos comentarios para el mejoramiento del presente trabajo. Al Doctor Oscar Campos (Coordinador del Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra en el 2003) gracias por el voto de confianza. A mi compañero y amigo, Juan Manuel Caballero González, por ser mi amigo, y porque trabajando en equipo las cosas siempre salen mejor.

A la Secretaría de Marina, por haberme dado la oportunidad de estudiar la maestría, esperando que los frutos sean de utilidad para la Institución. A los CC. Vicealmirante SIA. Ing. Nav. Edgar Fernando Narro y Quesada; Contralmirante CG. DEM. Carlos Octavio Angulo Jiménez y Capitán de Fragata CG. Juan Martín Aguilar Morales, por tener sus puertas abiertas. Al C. Contralmirante CG. DEM. Anastasio Francisco de Abiega Gámez, por haber sido de su consideración para la maestría y por sus consejos. Al C. Cap. Corb. CG. Gabriel Balcázar Silva y oficiales de la Dirección de Meteorología Marítima, por su apoyo en cubrir mis funciones durante este tiempo.

A Elías Piña, mi profesor y amigo de matemáticas, por su apoyo académico y personal ¡mantén firme la caña, llegarás a puerto seguro!. A Alberto, mi profesor de matemáticas en la UNAM, por su paciencia y buena disposición para la enseñanza. A Rosa Elena Morales, Sergio Abarca y Alejandro Zitácuaro, por su apoyo para el desarrollo de diversos programas, pero principalmente por su amistad. A Lorena y Caro, mis buenas amigas, siempre tendrán un lugar especial dentro de mí. Al Ingeniero Gustavo Vázquez, por su apoyo en cómputo. A todos los compañeros del Grupo de Meteorología Tropical: Miguel Sesma, Edgar, Gerardo, Abraham, Matías y Genaro.

Dedicatoria

A mi Madre. Infinitamente agradecido por estar conmigo en el mal y buen tiempo, por tus consejos de Madre y porque eres el puerto seguro donde llegar.

A mis hermanos Gerardo y Alejandra. Me siento orgulloso de ser su hermano, los quiero mucho.

A mi Padre. Gracias por el apoyo. "Por una buena mar y mejores vientos".

Índice

Agradecimientos

Dedicatoria

Capítulo I **Introducción**

1.1	Casos de huracanes en México	1
1.2	¿Qué es un huracán?	6
1.3	Pronósticos de huracanes	9
1.4	Predictibilidad de eventos meteorológicos	12
1.5	Ventajas y desventajas del pronóstico por ensamble	15
1.6	Gráficos del pronóstico por ensamble	16
1.6.1	Gráficos de dispersión	16
1.6.2	Gráficos de probabilidad	17
1.6.3	Gráficos de espaguete	18
1.7	Objetivo del estudio	19

Capítulo II **Modelo de predicción y datos**

2.1	El modelo de mesoescala MM5	21
2.2	El MM5 como modelo de pronóstico extendido	25
2.3	Datos para iniciar el modelo	27
2.4	Estrategia de los experimentos	29
2.4.1	Huracán “Marty”	30
2.4.2	Huracán “Marty” (con vórtice artificial)	32
2.4.3	Huracán “Iván”	34
2.5	Metodología de verificación de los resultados	36

Capítulo III **Simulaciones – Pronóstico de huracanes**

3.1	Huracán Marty	39
3.1.1	Descripción sinóptica	39
3.1.2	Descripción de la simulación	42
3.1.3	Importancia de la condición inicial	51
3.2	Huracán Marty (con vórtice artificial)	52
3.2.1	Descripción de la simulación	52
3.2.2	Importancia del pronóstico por ensamble	60
3.3	Huracán Iván	61
3.3.1	Descripción sinóptica	61
3.3.2	Descripción de la simulación	63
3.3.3	Importancia de los pronósticos probabilísticos	73

Capítulo IV **Conclusiones**

4.1	Importancia del pronóstico probabilístico para casos de huracanes	74
4.2	Importancia para el SIAT CT	77
4.3	Trabajo a futuro	77

Apéndice

Declaración de las variables utilizadas en las ecuaciones de pronóstico del MM5.	79
--	----

Referencias	81
-------------	----

Capítulo I

Introducción

1.1 Casos de huracanes en México

El 14 de septiembre de 1995 el entonces presidente de México Ernesto Zedillo, dio la salida a la flota camaronera en la bahía de Topolobampo, Sinaloa. Dos días después, cuando el luto cubrió a cientos de hogares, este hecho fue bautizado por la comunidad como “el banderazo de la muerte”. Una mujer de 39 años relata que cuando despidieron a sus esposos, no sabían que el huracán “Ismael” se encontraba en el Pacífico, cerca de la costa donde se desarrolla la actividad pesquera. Una madre de cinco hijos despidió a su esposo en el muelle en 1995, poco después viajó a Topolobampo donde fue rescatado el cadáver de su marido de entre los escombros y el lodo. “Ismael” provocó la muerte de al menos 100 pescadores y varios desaparecidos [La Jornada, 14 de septiembre de 1996 (a un año del trágico acontecimiento)]. Expedientes sobre muertes asociadas a ciclones tropicales en la costa oeste del territorio nacional -disponibles en el Centro Nacional de Huracanes de Miami, Florida- convierten a “Ismael”, como el quinto huracán del Pacífico del este más mortal del siglo pasado. Muchos de los que murieron se encontraban a bordo de buques pesqueros, que encontraron fuertes vientos y grandes olas en el Golfo de California (Mayfield, 1995).

El riesgo que representan los huracanes a un determinado país, está en función de la amenaza –probabilidad de que ocurra un evento con suficiente intensidad para ocasionar daños- y, de la vulnerabilidad del país a su impacto. La vulnerabilidad es un concepto complicado que tiene dimensiones físicas, sociales, económicas y políticas. Incluye aspectos como la capacidad de las estructuras para resistir la fuerza de un evento severo, el grado que posee la comunidad para organizarse y manejar las emergencias, la economía del país que puede depender de un sólo producto o servicio que fácilmente puede ser afectado por el desastre, así como el grado de centralización en la toma de decisiones del sector público (Wilches, 1989).

Las comunidades, países o regiones difieren grandemente en vulnerabilidad, y por ende, en los efectos que pueden sobrellevar a causa de huracanes de igual magnitud. El tamaño mismo de un país es un determinante crítico de su vulnerabilidad, como lo pueden ser pequeñas islas que se ven afectadas en toda su extensión, y su principal infraestructura y actividad económica puede ser diezmada por un solo evento. Como consecuencia, los escasos recursos destinados a proyectos de desarrollo, tienen que ser ahora destinados al socorro y reconstrucción después del desastre, retardando el crecimiento económico. La población y actividades económicas en las regiones costeras, son altamente vulnerables a los efectos destructivos de un huracán, como pueden ser:

Efectos
destructivos de
un huracán

- **Viento:** Puede alcanzar una intensidad de 250 km/h, con ráfagas que exceden los 360 km/h. La mayor destrucción, número de víctimas y daños se debe a objetos acarreados por el viento.
- **Marea de tormenta:** Representa la mayor amenaza para las comunidades costeras. El noventa por ciento de las víctimas de huracanes corresponde a personas que se ahogan a causa de una marea de tormenta.
- **Oleaje:** La gran intensidad y extensión del campo de viento genera un fuerte oleaje que pone en riesgo a la navegación, y seguridad de la vida humana en la mar.
- **Precipitación:** La fuerte precipitación causa dos tipos de destrucción. El primero se debe a la filtración del agua en los edificios, causando daños estructurales que pueden colapsar por el peso del agua absorbida. El segundo, más generalizado y común, es la inundación sobre tierra, que pone en riesgo instalaciones críticas de transporte como puentes y carreteras, así como cultivos, ganado, viviendas y salud de la población en general.

Por citar un ejemplo, durante la temporada de ciclones tropicales 2003, el estado de Baja California Sur se vió afectado por dos huracanes en el transcurso de menos de 30 días -Ignacio y Marty-; ambos sistemas alcanzaron su mayor intensidad poco antes de impactar en tierra, afectando prácticamente la misma región del estado con similar magnitud. Los daños más importantes se reportaron en la infraestructura carretera y eléctrica, debido a fuertes vientos, inundaciones y escurrimientos súbitos ocasionados por lluvias intensas (Fig. 1). Los huracanes Ignacio y Marty generaron situaciones de emergencia y cuantiosos daños en los cinco municipios de Baja California Sur, por lo que tanto el primero de septiembre, como el dos de octubre del 2003, se emitieron declaratorias de desastre natural para todos los municipios de la entidad, de esta forma, se tuvo acceso a los recursos del Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN).



Figura 1. Daños a la infraestructura carretera en Baja California Sur ocasionados por los huracanes Ignacio y Marty. (Fuente: SCT).

El Gobierno Federal informó dos muertes asociadas a “Ignacio” y doce a “Marty”. Así mismo, de acuerdo con estimaciones del gobierno estatal, el monto de los daños ocasionados por el paso del huracán “Ignacio” sobre Baja California Sur, asciende a 180 millones de pesos, mientras que para “Marty”, los daños fueron superiores a 900,000 millones de pesos (ver tabla 1) (ERN, 2003).

	Huracán “Ignacio” (2003)	Huracán “Marty” (2003)
Daños en la SCT	Los daños en Baja California Sur, ascienden a 153.7 millones de pesos en el campo Comunicaciones y Transporte.	El monto total requerido para la rehabilitación de daños, asciende a 210 millones de pesos
Carreteras	En la red carretera federal, se vieron afectados 863 km de carreteras en tramos aislados, y 6 puentes de competencia federal. El monto total requerido para la reparación de estos daños fue de 82.7 millones de pesos.	En lo que respecta a la red carretera federal, red rural estatal y puentes federales se vieron afectados un total del 2,511 km.
Caminos rurales	En lo que respecta a la red rural estatal, se vieron afectados 2,250 km de caminos rurales y alimentadores en los 5 municipios del estado. El monto total requerido para la rehabilitación de daños fue de 71.07 millones de pesos.	Respecto a los daños ocasionados en la red de caminos rurales y alimentadores, se dañaron 92 caminos en los 5 municipios, cuyo costo asciende a 40 millones de pesos.
Marítimo portuario	Los Puertos de La Paz, Los Barriles, San Carlos, Bahía Magdalena, Adolfo López Mateos, Loreto y Santa Rosalía, se vieron afectados y cerrados a la navegación.	Los Puertos de La Paz, Los Barriles, San Carlos, Bahía Magdalena, Adolfo López Mateos, Loreto y Santa Rosalía, se vieron afectados y cerrados a la navegación.
Comunicaciones	La estación de radio XEBCS-AM propiedad del Gobierno del Estado, se vio afectada por daños en la Comisión Federal de Electricidad. En Santiago, municipio de La Paz, BCS, se reportaron daños a la fibra óptica. En La Ribera, municipio de La Paz, BCS, se vieron afectadas las líneas telefónicas por falta de energía eléctrica.	Resultaron dañadas 7 estaciones de radio, dos canales de televisión y se suspendió el servicio telegráfico y postal.
Auto transportes	Se vieron afectadas las corridas de autobuses con origen en La Paz hacia sur y norte del estado.	
Aeropuertos	Se suspendieron los vuelos en varios Aeropuertos: La Paz, Loreto, San José del Cabo.	

Tabla 1. Daños reportados en el campo de comunicaciones y transportes en el estado de Baja California Sur, por el paso de los huracanes Ignacio y Marty (Fuente: SCT, disponible en: http://www.ern.com.mx/Inf_Hura.asp).

Una vez que se entiende el riesgo que representan los huracanes, se pueden tomar medidas específicas para reducir daños en las comunidades, infraestructura y actividades económicas. Las pérdidas humanas y económicas pueden ser reducidas considerablemente con esfuerzos bien organizados, implementando medidas preventivas apropiadas respecto a la percepción del peligro y emisión de alertas oportunas (Wilches, 1989).

En el año 2000, surge en nuestro país el SIAT CT (Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales), que es una herramienta de coordinación en el alertamiento a la población, y acción institucional ante la amenaza de un ciclón tropical. Se sustenta en la interacción de los principales actores del Sistema Nacional de Protección Civil, que son: la sociedad civil y sus organizaciones; instituciones de investigación meteorológica e inclusive quienes estudian sus efectos sociales; medios de comunicación masiva y la estructura gubernamental del Sistema Nacional de Protección Civil (SEGOB, 2003).

A los tres años de aplicación del SIAT CT, se reunieron más de 40 representantes de diversas dependencias del gobierno federal, gobiernos estatales y municipales, organizaciones sociales, centros e instituciones de investigación, así como organizaciones privadas, para recolectar las experiencias obtenidas de los periodos anteriores, corregir deficiencias y trabajar en la actualización del SIAT CT; presentándose para su aplicación a partir de la temporada de ciclones tropicales 2003. La nueva versión del SIAT CT, tiene como objetivo ser un mecanismo de alertamiento y coordinación que, de común acuerdo, genere una respuesta organizada del Sistema Nacional de Protección Civil, ante la amenaza de un ciclón tropical (SEGOB, 2003).

Dentro de las reglas de operación, la Dirección General de Protección Civil (DGPC), será la única instancia que determine la etapa de alertamiento que corresponda, a través de los "Boletines de Alertamiento de Protección Civil", que contendrá la información que la DGPC considere pertinente, de acuerdo a los pronósticos de trayectoria de ciclones tropicales emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional, integrante del Sistema Nacional de Protección Civil. Entre el 1º y el 14 de mayo de cada año, la DGPC remitirá a cada instancia participante, el formato que será utilizado para los Boletines de Alertamiento de Protección

Civil, junto con una comunicación que especifique la fecha de inicio de aplicación del SIAT CT, de conformidad con los criterios utilizados por el Servicio Meteorológico Nacional.

1.2 ¿Qué es un huracán?

El huracán sigue siendo uno de los enigmas excepcionales de la dinámica atmosférica. Esto en parte se debe a que el fenómeno es difícil de observar, y porque en la actualidad no se ha descubierto laboratorio análogo alguno (Emanuel, 1991). Según Marks, Jr. (2003), el término “huracán” es usado en el hemisferio occidental para las clases generales de fuertes ciclones tropicales.

Un ciclón tropical es un sistema de baja presión que deriva su energía principalmente de la evaporación del agua del mar, y de la condensación asociada a nubes convectivas cerca de su centro. Kleinschmidt (1951), fue el primero en reconocer que la fuente de energía de los huracanes reside en el desequilibrio termodinámico entre la atmósfera tropical y los océanos. La razón de transferencia de calor del océano a la atmósfera, está en función de la velocidad del viento en superficie, siendo un tema de mucha controversia e investigación. En esencia, “la génesis de un huracán puede ser pensada como una superficie de viento inducido, originada por una inestabilidad de amplitud finita en el intercambio de calor de la atmósfera tropical, donde al incrementarse la intensidad del viento en superficie, se incrementa la transferencia de calor procedente del océano, llevando a la intensificación de la tormenta y así sucesivamente” (Emanuel, 1986).

Estructuralmente hablando, los vientos ocasionados por un ciclón tropical alcanzan su máxima intensidad cerca de la superficie -una consecuencia de ser de núcleo cálido¹ en la tropósfera-, decreciendo gradualmente hacia la atmósfera superior hasta que el flujo se vuelve anticiclónico, aproximadamente a unos 15 kilómetros de la superficie (Fig. 2). La estructura y evolución de un ciclón tropical se basa en la contradicción fundamental, de que mientras la circulación del aire en su interior representa un equilibrio aproximado de fuerzas que afectan a

¹ El término “núcleo cálido” se refiere a que en un mismo nivel de presión, el aire localizado en el centro del ciclón es más cálido del que se encuentra en la periferia

cada parcela de aire, se requiere de una ligera separación del estado de equilibrio para generar movimientos ascendentes que resultan en la formación de nubes, precipitación y cambios en la intensidad del ciclón tropical. La región interna de la tormenta tropical denominada como núcleo del ciclón, contiene la pared del ojo y el ojo que caracteriza a los ciclones tropicales en imágenes de satélite y de radar. Los fuertes vientos en el núcleo ocupan sólo del uno al cuatro por ciento del área total del ciclón, mismos que amenazan a las actividades humanas y hacen que la dinámica del ciclón sea única.

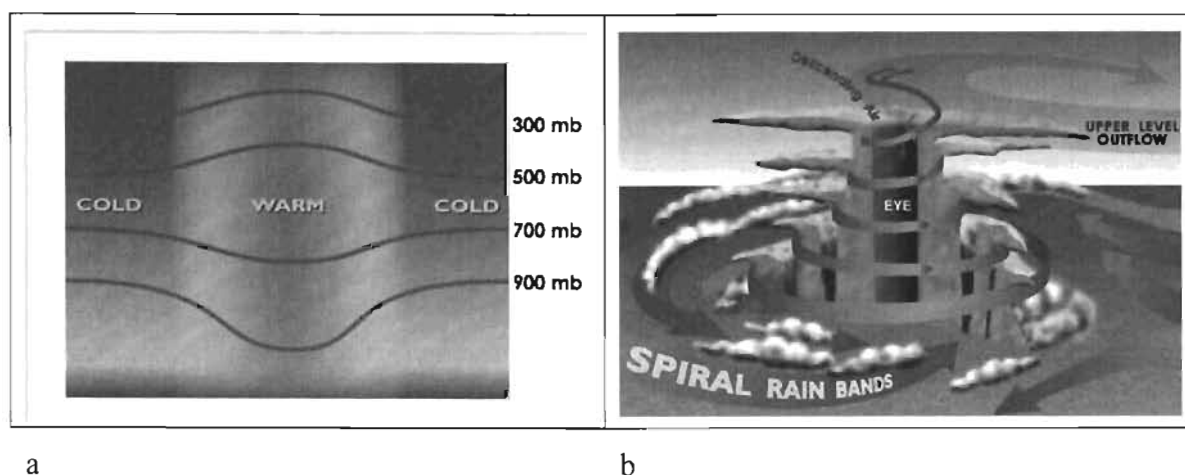


Figura 2. (a) Temperatura e isobaras de un ciclón tropical de núcleo cálido. (b) Circulación ciclónica en niveles bajos y circulación anticiclónica en niveles altos de un ciclón tropical.

Un ciclón tropical con vientos sostenidos de entre 17 y 32 m/s, es conocido como tormenta tropical; mientras que un ciclón tropical con vientos igual o mayor a 33 m/s, es referido como huracán o tifón. Una vez que un ciclón tropical alcanza vientos de magnitud igual o mayor a 50 m/s, es referido como un huracán mayor o supertifón. En el Atlántico y Pacífico oriental, los huracanes son clasificados de acuerdo a la escala de intensidades Saffir-Simpson (ver tabla 2).

Categoría	Presión (hPa)	Viento (m/s)	Altura Olas (m)	Daños
1	>980	33-42	1.0-1.7	Mínimos
2	979-965	43-49	1.8-2.6	Moderados
3	964-945	50-58	2.7-3.8	Extensos
4	944-920	59-69	3.9-5.6	Extremos
5	<920	≥70	≥5.7	Catastróficos

Tabla 2. Escala de intensidad de huracanes Saffir-Simpson. (Fuente: National Hurricane Center)

La escala de intensidades Saffir-Simpson clasifica a los huracanes en una escala del uno al cinco, donde la categoría uno es la más débil y la cinco la más intensa. Los huracanes mayores corresponden de la categoría tres en adelante. Las razones por las que algunas perturbaciones tropicales se intensifican a huracán y otras no, todavía no son bien entendidas. Tampoco es claro porqué algunos ciclones tropicales se convierten en huracanes mayores y otros no. Finalmente, el asunto de la trayectoria de los huracanes permanece como centro de atención en la actual investigación.

Estudios climatológicos revelan que la formación de ciclones tropicales esta confinada en una región localizada entre los 30° N y 30° S, con el ochenta y siete por ciento de ellos localizados dentro de los primeros 20° a partir del ecuador. De estas observaciones parecen existir al menos cinco condiciones necesarias para el desarrollo de un ciclón tropical:

- 1. Temperatura cálida de la superficie del mar (TSM):** Numerosos estudios sugieren un criterio mínimo de la TSM de 26° C, y una profundidad de la capa de mezcla de aproximadamente 50 metros. Esta condición es necesaria pero no suficiente para la formación de un ciclón tropical.
- 2. Vorticidad planetaria:** Los ciclones tropicales no se forman dentro de los primeros tres grados a partir del ecuador, ya que el parámetro de Coriolis² desaparece en el ecuador, pero se incrementa rápidamente hacia los polos. Por lo tanto, es necesario un valor diferente de cero de la vorticidad planetaria para la formación de un ciclón.
- 3. Débil o nulo cizallamiento vertical del viento horizontal:** Para que un ciclón tropical se pueda desarrollar, el calor latente generado por la convección se debe mantener cerca del centro de la tormenta. Si la cizalladura vertical es fuerte, los ciclones tropicales se debilitan.

² Parámetro de Coriolis (f) = $2\Omega \sin \lambda$, donde λ = latitud y Ω = Velocidad angular de la Tierra.

4. **Inestabilidad atmosférica:** La tropósfera debe ser condicionalmente inestable para mantener la convección por un periodo de tiempo extendido, esta condición usualmente se satisface sobre los trópicos.

5. **Humedad troposférica:** Cuanta más alta sea la humedad en niveles medios, más tiempo podrá mantenerse saturada una parcela de aire durante su ascenso. Una humedad relativa de entre cincuenta y sesenta por ciento en niveles bajos y medios, es suficiente para mantener la parcela saturada.

Las condiciones anteriores se presentan normalmente en las estaciones de verano y otoño. Sin embargo, aún cuando todas las condiciones sean favorables, no necesariamente se presenta una ciclogénesis tropical. De hecho, hay creciente evidencia de una variabilidad interanual en la actividad de ciclones tropicales, donde varios de ellos se forman en periodos que van de una semana a diez días, seguido por dos o tres semanas con poca o ninguna actividad ciclogénica.

1.3 Pronósticos de huracanes

En abril de 1950, Jule Charney y John von Neumann, elaboraron un histórico primer día de pronóstico con la computadora ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer, por sus siglas en inglés). Se utilizó una malla bidimensional de 270 puntos, con una resolución espacial de 700 kilómetros para la región de Norteamérica. Los resultados obtenidos se encontraban lejos de la precisión, pero justificaron el trabajo a futuro. Las primeras predicciones numéricas de tipo operativo se llevaron a cabo en mayo de 1955, con una computadora IBM 701, en un proyecto conjunto de la Fuerza Aérea y la oficina meteorológica de los Estados Unidos.

Los previsores del *National Hurricane Center* (NHC, por sus siglas en inglés) en Miami, Florida, utilizan diversos modelos para el pronóstico de huracanes, y en los últimos veinte años, los errores en los pronósticos han disminuido poco menos del uno por ciento por año en

promedio. Gran parte de esto se debe al progreso de los modelos de predicción que se clasifican en tres tipos: 1. Modelos estadísticos, que asocian el movimiento del huracán con casos del pasado; 2. Modelos dinámicos, solucionan las ecuaciones físicas fundamentales que describen la dinámica de la atmósfera y 3. Modelos estadístico-dinámicos, que utilizan los resultados de los modelos dinámicos como entrada a la descripción estadística del movimiento de la tormenta.

Todos los modelos operacionales del NHC requieren las salidas de los modelos globales para el pronóstico de trayectoria de ciclones tropicales, con excepción del modelo estadístico de CLImatología y PERsistencia (CLIPER), que emplea la latitud y longitud inicial de la tormenta, los componentes del vector de movimiento, el día Juliano y su intensidad inicial (Neumann, 1972). Los pronósticos del CLIPER son a menudo utilizados como referencia para evaluar la habilidad en el pronóstico de trayectoria de los otros modelos. Por otro lado, el promedio de los errores del CLIPER en el Pacífico oriental, son considerablemente menores que en el Atlántico, consistente con la relativa suavidad de las trayectorias y la falta de recurvamientos de las tormentas en el Pacífico oriental. Asombrosamente el CLIPER fue difícil de batir por los modelos dinámicos hasta los años 80.

La *Air Force Weather Agency* (AFWA, por sus siglas en inglés), utiliza el modelo dinámico de mesoescala diseñado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR, por sus siglas en inglés), comúnmente conocido como MM5. Cuando se emite una advertencia de ciclón tropical, la AFWA determina las posiciones futuras del centro de la tormenta de acuerdo con los valores mínimos de presión pronosticados por el MM5. Esta información es enviada al *Joint Typhoon Warning Center* (JTWC, por sus siglas en inglés), en Hawai, y al *Hydrometeorological Prediction Center* (HPC, por sus siglas en inglés) en Miami, Florida. Tanto el JTWC como el HPC, hacen un consenso del pronóstico de trayectoria, comparando los resultados del MM5 con otros modelos de pronóstico como el de la Armada de los Estados Unidos y Servicio Meteorológico de Japón. Según las estadísticas recaudadas por el JTWC, las trayectorias pronosticadas por el MM5, son comparables con los pronósticos obtenidos por los modelos de los servicios meteorológicos antes mencionados (Fig. 3).

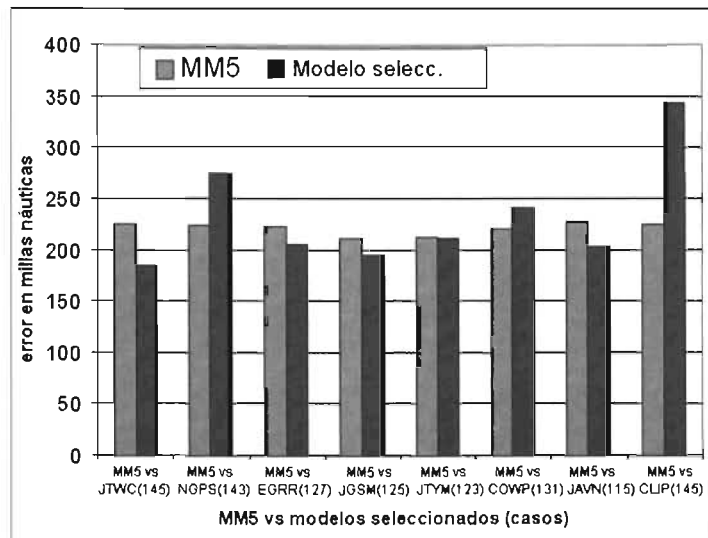


Figura 3. Error en los pronósticos de trayectoria a 72 horas de la temporada de ciclones tropicales 2001. (Fuente: JTWC).

Hausman (2001), define los alcances y limitantes del modelo MM5 del AFWA:

Alcances

- Los sistemas frontales son bien representados en los campos del modelo -vía gradientes de temperatura y cambios en la dirección del viento- y, generalmente, pronosticados con exactitud.
- Los pronósticos de precipitación a gran escala los hace bien, presentándose algunos problemas con la ocurrencia de eventos extremos.
- Los pronósticos de sistemas convectivos de latitudes medias cotejan absolutamente bien.

Limitantes

- Pronostica demasiada convección en los trópicos.
- Los pronósticos de evolución de ciclones tropicales dependen de las condiciones de frontera utilizadas.

1.4 Predictibilidad de eventos meteorológicos

El pronosticador de hoy en día confía principalmente en las soluciones generadas por modelos de predicción numérica del tiempo, siendo cada vez más precisos y sus mejoras van en proporción directa al entendimiento físico de la atmósfera, mejores fuentes de datos, metodologías de asimilación y recursos computacionales. Cuando se desea determinar el valor preciso a futuro de una variable meteorológica, se habla de pronósticos determinísticos. En principio, dichos pronósticos no consideran la incertidumbre, aún cuando arrojan soluciones de las predicciones muy cercanas a la realidad. No obstante, no representan completamente todos los procesos físicos de la atmósfera. Aún si fuera posible incluir toda la física atmosférica en los modelos determinísticos, no es posible escapar de la incertidumbre de una predicción debido a que no se conoce con todo detalle el estado de la atmósfera en un instante dado. Lorenz, en 1963, terminó con el sueño de llevar a cabo pronósticos perfectos, pues condiciones iniciales ligeramente diferentes a la “verdadera”, darán como resultado diversas proyecciones en el futuro. Esta sensibilidad a la condición inicial es una característica de los sistemas caóticos -no lineales-.

En la figura 4, se muestra una analogía de un sistema caótico con una máquina de canicas, donde al impulsar una canica colocada sobre el punto “C” -condición inicial-, esta recorrerá un camino entre los diversos postes para quedar depositada en alguno de los recipientes al final. Si se colocara una segunda canica en el punto “C”, la probabilidad de que recorra el mismo camino que la primera es mínima, pues una pequeña diferencia en su posición inicial –ya sea más a la derecha, izquierda, atrás ó adelante-, ó en la fuerza del impulso, inevitablemente hará que el camino a recorrer sea diferente, quedando al final depositada en otro recipiente. No obstante, si se hace el experimento con cien canicas por ejemplo, la distribución de las canicas indicará cuál es la condición más probable que se presente. En este ejemplo, el recipiente de en medio fue el que más canicas colectó, por lo que se puede decir que existe una alta probabilidad de que el mismo recipiente vuelva a obtener el mayor número de canicas con otro experimento de cien.

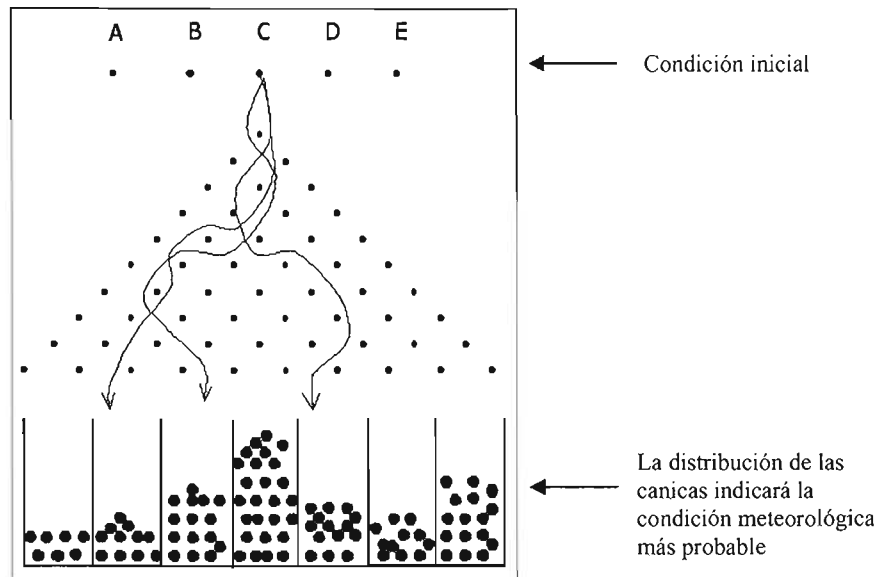


Figura 4. Analogía de un sistema caótico con una máquina de canicas.

La predictibilidad³ de los pronósticos numéricos del tiempo está limitada principalmente por:

1. Diferencias entre el estado atmosférico “verdadero”, y la condición inicial de los modelos de predicción numérica del tiempo (error de análisis).
2. Incompleta o inadecuada física del modelo (error del modelo).

Se cree que el error de análisis es el principal contribuyente de los errores en los pronósticos numéricos del tiempo a corto plazo (Anthes, 1986), que provienen de dificultades en la interpolación de observaciones irregularmente distribuidas, a una malla regularmente distribuida. Puesto que no es realista esperar que un análisis iguale el estado inicial de la atmósfera “verdadera”, los errores introducidos plantean un límite en la predictibilidad, no importando cuán hábil pueda ser el modelo. Por otro lado, los errores no solamente recaen en el error de análisis, sino también en el modelo (Tribbia y Baumhefner, 1988), ya que existe un estado de incertidumbre para procesos de pequeña escala tales como: convección, microfísica de nubes, etc.

³ Predictibilidad.- Conectado con la habilidad para mostrar qué pasará en el futuro.

Puede parecer que los sistemas caóticos no son pronosticables, y en cierto sentido es cierto, pues no es posible hacer pronósticos exactos a un futuro distante. Sin embargo, el caos “*per se*” no implica que no se puedan hacer pronósticos precisos en algún sentido a mediano plazo. Epstein (1969) y Leith (1974), propusieron que en vez de llevar a cabo pronósticos “determinísticos”, se hicieran pronósticos “probabilísticos”, pues proporcionan una valoración de la incertidumbre en la predicción.

El “**método de ensamble**” es una forma computacionalmente viable para estimar la evolución en el tiempo de la función de densidad de probabilidad (FDP) del estado inicial de la atmósfera, proporcionando una base cuantitativa para el pronóstico probabilístico. Esta metodología se desarrolla creando variaciones en la condición inicial, parametrizaciones físicas, empleando diferentes modelos ó cualquier combinación de éstas. La principal ventaja de los ensambles es que son intrínsecamente probabilísticos para todos los campos pronosticados, y así que pueden expresar directamente la incertidumbre en el pronóstico (Tracton y Kalnay, 1993; Palmer, 2002). De esta forma, los usuarios pueden tomar decisiones basadas en la probabilidad de ocurrencia de un evento meteorológico, y crear sus propias estimaciones de riesgo. Palmer (2002), discutió el ciclón extratropical que devastó partes de Europa el 26 de diciembre de 1999. Si bien un solo pronóstico determinístico del *European Center for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF, por sus siglas en inglés), no intensificó a la tormenta, aproximadamente una tercera parte de los 50 miembros del ensamble del ECMWF, desarrollaron una intensa ciclogénesis con una probabilidad por arriba del 30 por ciento de rachas superiores a 40 m/s en algunas localidades (Figs. 3 y 4 en Palmer 2002).

Cuando se pronostica a mediano o largo plazo, se habla de alta o baja predictibilidad, que depende de la dispersión del conjunto de soluciones del ensamble. Es decir, si la mayoría de los miembros de un ensamble acuerdan en pronosticar el valor de una variable meteorológica en el tiempo, esto habla de una baja dispersión del conjunto de soluciones o de una alta predictibilidad en el pronóstico. Si por el contrario, las soluciones divergen en el tiempo, esto habla de que las soluciones del ensamble no convienen en fijar un valor para la variable meteorológica pronosticada, es decir, existe una baja predictibilidad en el pronóstico (Fig. 5).

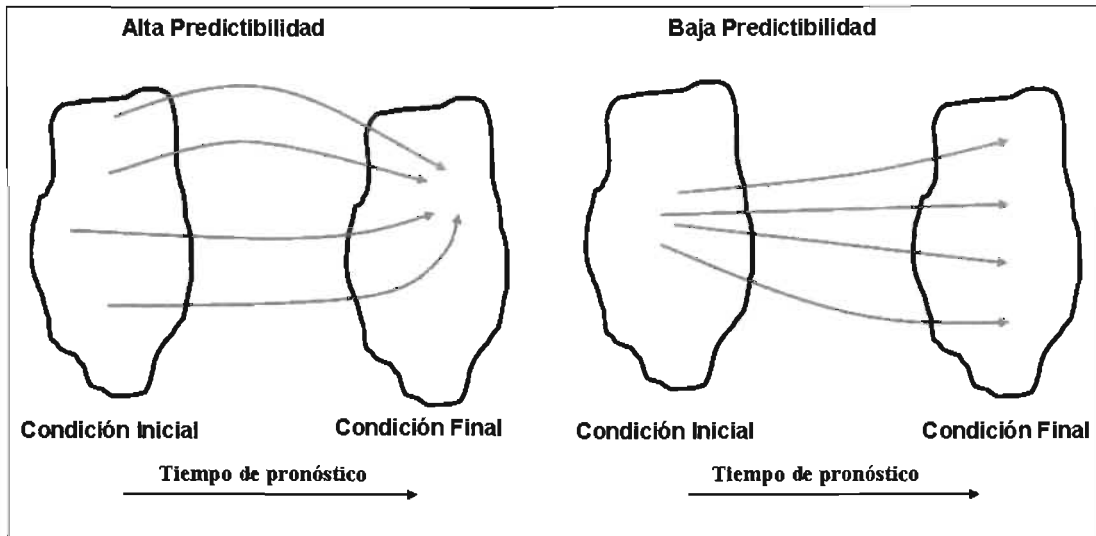


Figura 5. Alta o baja predictibilidad del pronóstico por ensemble.

1.5 Ventajas y desventajas del pronóstico por ensemble

Ventajas

- Proporciona un promedio de los pronósticos del ensemble que más allá de los primeros días, es más preciso que los pronósticos individuales, pues los componentes más inciertos tienden a quedar fuera de la media del ensemble (Kalnay, 2003).
- Los resultados del ensemble son interpretados directamente en términos de pronósticos probabilísticos (Kalnay, 2003).

Desventajas

- Se requiere una considerable capacidad de cómputo para llevar a cabo un pronóstico por ensemble (Jewson, 2003).
- Diagnosticar a cada uno de los miembros individuales del ensemble no es factible (Roebber, 2004).

1.6 Gráficos del pronóstico por ensamble.

Una forma rápida de estimar la incertidumbre o confiabilidad del pronóstico por ensamble, es a través de los siguientes tipos gráficos:

1.6.1 Gráficos de dispersión

Trabajos realizados por Buizza (1997) y Whitaker y Loughé (1998), relativo a los pronósticos por ensamble implementados en el *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP, por sus siglas en inglés) y en el ECMWF desde 1992, concluyeron que “la incertidumbre o confiabilidad en un pronóstico se refleja en la dispersión del conjunto de soluciones”. Es decir, regiones con escasa dispersión entre las soluciones del ensamble se les puede atribuir una mayor confiabilidad en el pronóstico, en tanto que regiones con mayor dispersión entre las soluciones del ensamble, es distintivo de una mayor incertidumbre o menor confiabilidad en el pronóstico. Con los gráficos de dispersión se pueden identificar las áreas de mayor ó menor incertidumbre, y el cálculo para cada punto de malla del dominio pronosticado se calcula como:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{i,j} - \bar{x}_{i,j})^2}$$

Donde “s” es la desviación estándar (ó dispersión) de los valores pronosticados para variable meteorológica seleccionada, “n” es el número de miembros del ensamble, “ $\bar{x}_{i,j}$ ” es la media del ensamble, y “ $x_{i,j}$ ” son los pronósticos individuales. Generalmente se traza en un mismo gráfico la media del ensamble y la dispersión de los pronósticos individuales. En la figura 6, se muestra un pronóstico a 60 horas para la variable presión atmosférica a nivel del mar, donde los contornos representan la media del ensamble, y el color de trasfondo la dispersión de los pronósticos en milibares. Las regiones con valores más altos de dispersión representan mayor incertidumbre o menor confiabilidad en el pronóstico.

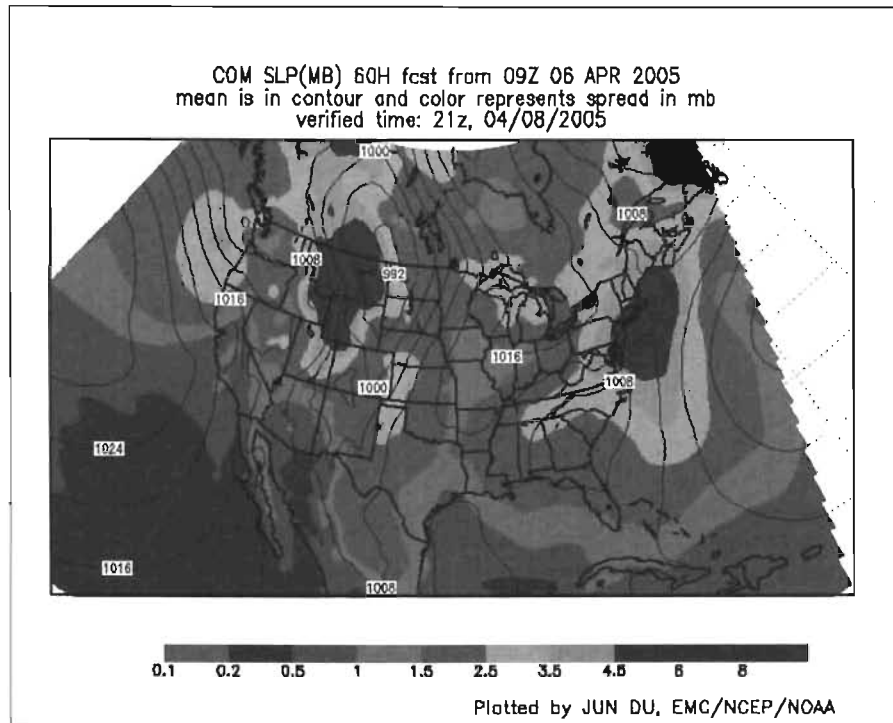


Figura 6. Gráfico de dispersión de los pronósticos del ensamble para la variable presión a nivel del mar.
 (Fuente: NCEP).

1.6.2 Gráficos de probabilidad

Dado un umbral preestablecido, pueden ser estimadas las regiones que tienen mayor probabilidad de ocurrencia de alguna variable meteorológica, por ejemplo, la probabilidad de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas, o la probabilidad de vientos superiores a 33 m/s –umbral de huracán-. El cálculo de las probabilidades para cada punto de malla se hace bajo la consideración de que todos los miembros del ensamble son equiparables. Es decir, no se atribuye ninguna especie de peso para alguno de los miembros, de esta forma, la probabilidad para cada punto de malla del dominio pronosticado se calcula como:

$$P = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,j}$$

Donde “ P ” es la probabilidad para cada punto de malla del campo pronosticado, “ n ” es el número de miembros del ensamble, y $x_{i,j}$ es el evento pronosticado.

En la figura 7, se muestra un pronóstico a 60 horas de la probabilidad de ocurrencia de más de 0.25 pulg. (6.35 mm) de precipitación acumulada en 24 horas, donde los contornos a color representan los porcentajes de probabilidad.

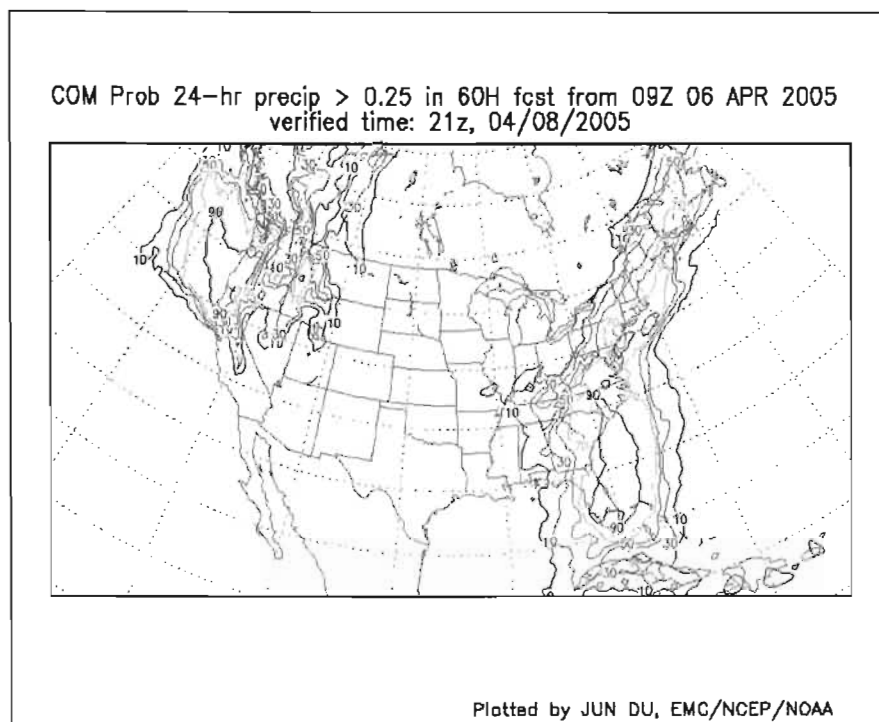


Figura 7. Gráfico de probabilidad de más de 0.25 pulg. de precipitación acumulada en 24 horas. (Fuente: NCEP).

1.6.3 Gráficos de espagueti

El pronosticador puede ver los pronósticos de todos los miembros del ensamble con el uso de “gráficos de espagueti”, donde se muestran los valores para la variable meteorológica de interés, y que puede ser un buen complemento para los gráficos de dispersión. En la figura 8, se muestra un pronóstico válido a 60 horas -a partir de la condición inicial- para la isoterma de 10° C en el nivel de 850 milibares.

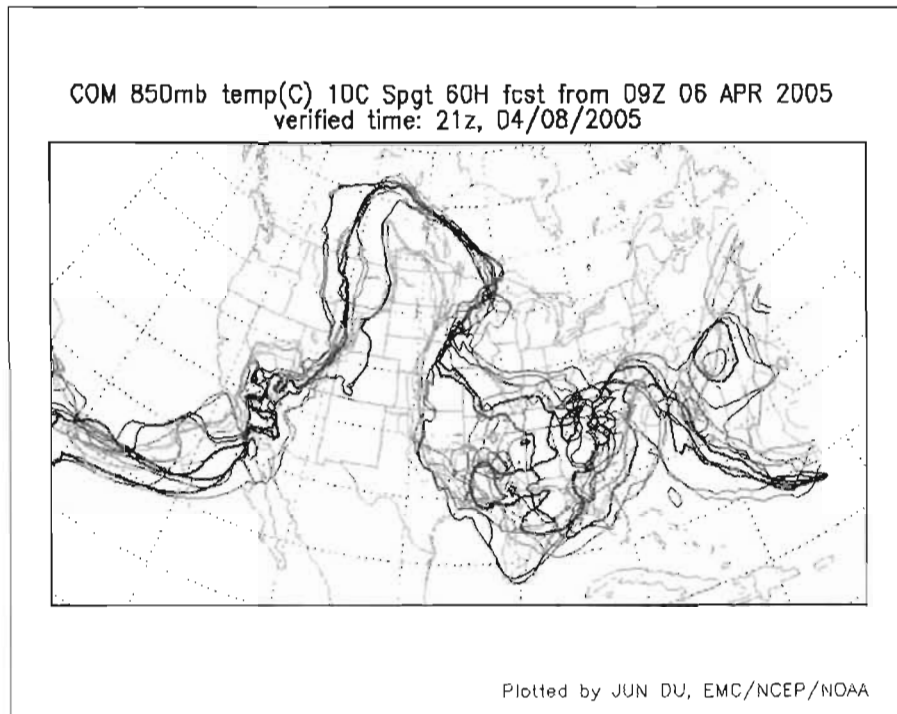


Figura 8. Gráfico de espagueti de los pronósticos del ensemble para la isoterma de 10° C en el nivel de 850 mb.
(Fuente: NCEP)

1.7 Objetivo del estudio

El huracán sigue siendo uno de los enigmas excepcionales de la dinámica atmosférica, y en la actualidad aún quedan muchas preguntas por contestar relacionadas con la estructura, intensificación y trayectoria de los ciclones tropicales. Aún si fuera posible incluir todos los procesos físicos relacionados con la estructura y evolución de un ciclón tropical en un modelo determinístico, no es posible escapar de la incertidumbre de una predicción debido a que no se conoce con detalle el estado de la atmósfera en un instante dado.

Como alternativa se propone una metodología de pronóstico a mediano plazo por ensemble –probabilístico en vez de determinístico–, para casos de huracanes cercanos a México, pues en diversos estudios se ha demostrado que los ensambles tienen una mayor habilidad en el pronóstico, al estimar la evolución en el tiempo de una función de densidad de probabilidad donde puede quedar integrada la solución, y expresarse en términos de probabilidad.

Para ello se analiza la capacidad de extender los pronósticos hasta 120 horas, de la trayectoria, intensidad del viento y precipitación ocasionados por un ciclón tropical. Las respuestas al planteamiento anterior, sentarán las bases para que el pronóstico probabilístico del tiempo a mediano plazo, sea implementado de forma operativa como una herramienta de planeación y de prevención de desastres.

Capítulo II

Modelo de predicción y datos

2.1 El modelo de mesoescala MM5

El modelo de PSU/NCAR (*Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research*) conocido como MM5, es un modelo de área limitada, no hidrostático, diseñado para simular o predecir la circulación atmosférica de mesoescala⁴. Está conformado por varios programas de preprocesamiento y postprocesamiento que son referidos colectivamente como el sistema de modelación MM5 (Fig. 9). Por ser un modelo de dominio público para la comunidad de Ciencias Atmosféricas, sus cambios y adecuaciones son probados por numerosos usuarios, por ello el MM5 se ha convertido en un modelo cada vez más confiable y robusto. La quinta generación del modelo de mesoescala de PSU/NCAR (MM5), es el resultado de diversos desarrollos a partir del modelo de mesoescala usado por Anthes, en la Universidad de Pennsylvania a principios de los años setenta (Anthes y Warner, 1978). Los módulos de preprocesamiento y postprocesamiento del MM5 (TERRAIN, REGRID, LITTLE_R, INTERPF, MM5) se describen a continuación:

TERRAIN: Preprocesamiento que define los dominios madre y anidados, resolución y tipo de proyección del mapa. Además asigna los valores de topografía y características del terreno.

REGRID: Preprocesamiento que lee en niveles de presión los análisis globales dispuestos en puntos de malla regular. Interpola a partir de la resolución de malla y proyección original, a la definida por TERRAIN. Cuenta con la entrada del programa de preprocesamiento TERRAIN, y crea los archivos para los módulos LITTLE_R o INTERPF. Estos archivos son usados generalmente como una primera conjetura para el análisis objetivo (LITTLE_R), ó como análisis que son directamente interpolados a los niveles establecidos por INTERPF.

⁴ Mesoescala.- Aplica a procesos que tienen dimensiones espaciales de 2 km a 2000 km, y escalas temporales de 1 hora a 3 días.

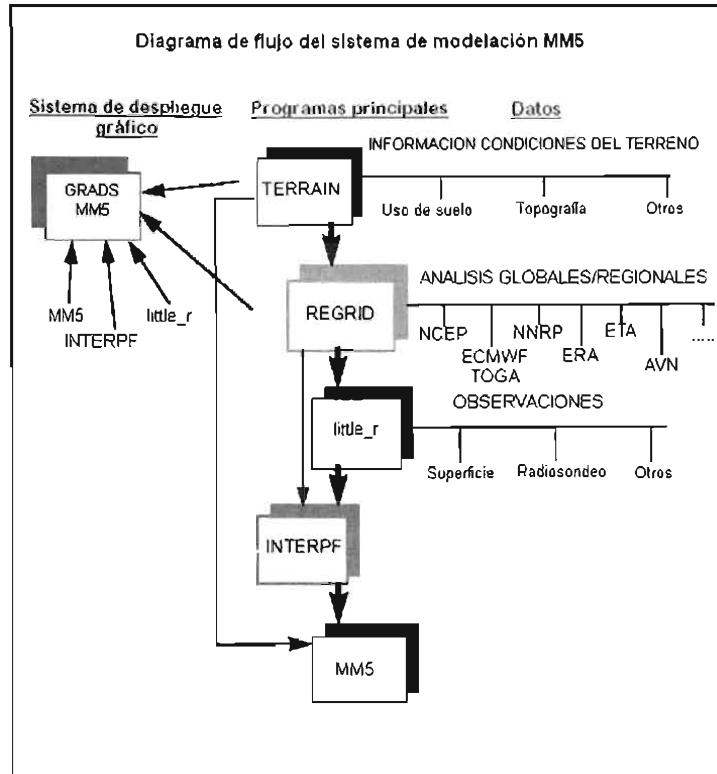


Figura 9. Estructura del sistema de modelación MM5.

LITTLE_R: Preprocesamiento donde se realiza el análisis objetivo de la información. Interpola los campos de la primera conjetura con datos observados de radiosondeo y de superficie.

INTERPF: Preprocesamiento que realiza la interpolación de niveles de presión a coordenadas verticales sigma. Las coordenadas verticales sigma permiten una mejor representación de la orografía, es adimensional y decrece monótonamente con la altura, definiéndose como:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$$

Donde σ es la coordenada vertical sigma, p_s es la presión en superficie y p_t es la presión en nivel más alto del modelo (100 mb).

MM5: Es la parte de predicción numérica del tiempo del MM5. Se puede usar para un amplio espectro de estudios teóricos y en tiempo real. El MM5 puede ser utilizado para estudios que implican sistemas convectivos de mesoescala, frentes, brisas de tierra-mar, circulaciones de montaña-valle e islas urbanas de calor. En términos de coordenadas que siguen el terreno (x,y,σ) , las ecuaciones para las variables básicas del modelo no hidrostático –excepto humedad- son las siguientes (Grell, 1994):

1. Presión (A partir de la ley de los gases, ecuación de continuidad y ecuación termodinámica).

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \mathcal{P} \nabla \cdot V = -V \cdot \nabla p' + \frac{\mathcal{P}}{T} \left(\frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (2.1)$$

2. Tres ecuaciones de movimiento en coordenadas esféricas (u,v,w) .

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -V \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - f w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{tierra}} + D_u \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -V \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + f w \sin \alpha - \frac{v w}{r_{tierra}} + D_v \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma} \frac{p'}{p} = -V \cdot \nabla w + g \frac{\rho_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + f(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{tierra}} + D_w \quad (2.4)$$

3. Ecuación termodinámica (A partir de la primera ley de la termodinámica).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + V \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (2.5)$$

El término de advección se puede desarrollar como:

$$V \cdot \nabla A \equiv mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \sigma \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (2.6)$$

Donde

$$\sigma = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad (2.7)$$

El término de divergencia en 2.1 se puede desarrollar como:

$$\nabla \cdot V = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (2.8)$$

* La declaración de las variables utilizadas en las ecuaciones de pronóstico del MM5, se pueden encontrar en el **Apéndice**.

En conclusión, son cinco ecuaciones de pronóstico para cinco variables ó incógnitas, más las ecuaciones de pronóstico correspondientes a vapor de agua y variables microfísicas. Se emplea el método de diferencias finitas de segundo orden centrado para la solución numérica de las ecuaciones básicas del MM5.

Dentro de las propiedades del MM5, versión 3 se encuentran:

- Diversos tipos de proyección.
- Considera las características del terreno (uso de suelo, topografía, cuerpos de agua, etc.)
- Capacidad de asimilación de datos observados (radiosondeos, estaciones de superficie, datos de viento derivados por satélite, etc.).

- Dinámica no hidrostática que permite al modelo ser usado en escalas de unos cuantos kilómetros.
- Opciones avanzadas de parametrizaciones físicas.
- Flexibilidad para realizar simulaciones para más de un dominio, ya sean anidados al dominio madre, o subdominios en diferentes regiones.

2.2 El MM5 como modelo de pronóstico extendido

Con una metodología de pronóstico por ensamble, Ramamurthy (2002), empleó el modelo MM5 para generar pronósticos a 120 horas de trayectoria e intensidad de ciclones tropicales. Para ello, la condición inicial fue perturbada variando los datos de entrada (análisis globales del NCEP, ECMWF y NOGAPS⁵), así como las opciones físicas del modelo (esquemas de parametrización de cúmulus, capa límite y humedad). Davis (2001), concluye que la evolución de un ciclón tropical puede ser muy sensible a las opciones físicas seleccionadas en el modelo.

Debido a que los análisis globales son integrados sobre dominios de baja resolución, los vórtices contenidos son extensos y débiles. La inicialización de un modelo de alta resolución a partir de análisis globales con baja resolución, dará como resultado una tormenta que prácticamente mantendrá sus características físicas desde la condición inicial hasta el final del pronóstico. Para mejorar la predicción en intensidad, es necesario insertar un vórtice artificial en la condición inicial cuya intensidad sea cercana a la de la tormenta observada. Para ello, primero se debe remover el amplio vórtice del análisis global, de otro modo, la condición inicial del MM5 contendría dos vórtices que pudieran estar localizados en dos diferentes lugares. Como segundo paso, se hace el cómputo del vórtice artificial para integrarlo al campo de trasfondo. Es decir, se interpola el vórtice artificial al campo de viento y de presión de su entorno, para no quedar como un objeto individual en la condición inicial (Davis, 2001). Ramamurthy aplicó el esquema de vórtices artificiales del MM5 para el caso del huracán “Floyd” del Atlántico, ocurrido en el mes de septiembre de 1999, dando como resultado un

⁵ NOGAPS.- Navy Operational Global Atmospheric Prediction System.

ciclón tropical mucho más intenso que requirió menos tiempo para su desarrollo. En la figura 10, se puede observar que con la aplicación de un vórtice artificial en la condición inicial, el pronóstico de viento en superficie del huracán “Floyd”, es mucho más intenso y requiere de menos tiempo para su desarrollo, comparado con el experimento sin vórtice artificial.

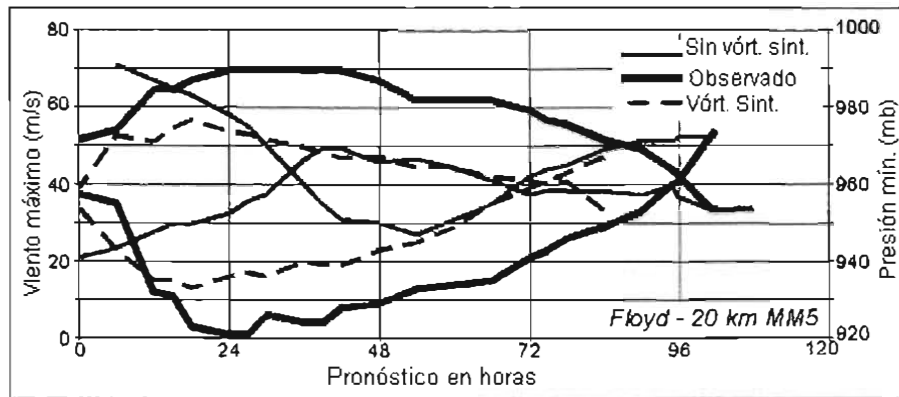


Figura 10. Pronósticos de viento en superficie del huracán “Floyd”. Con y sin aplicación de un vórtice artificial en la condición inicial. (Fuente: University of Illinois).

Las conclusiones a las que llegó Ramamurthy (2002), al final de los experimentos son las siguientes:

- El pronóstico por ensamble fue diseñado para incorporar la incertidumbre presente en la condición inicial.
- Las trayectorias de las tormentas mostraron una considerable dependencia de los análisis globales, a pesar del análisis objetivo subsiguiente.
- La localización del centro del ciclón difiere hasta 100 kilómetros entre los análisis globales del NCEP y del ECMWF.
- La dispersión de las trayectorias de los pronósticos, resultado de las perturbaciones en la física del modelo, fueron tan grandes como las ocasionadas por variaciones en los datos de entrada en la condición inicial. Se observaron diferencias significativas en la velocidad de desplazamiento de los ciclones pronosticados.

2.3 Datos para iniciar el modelo

Un modelo de pronóstico numérico del tiempo requiere de condiciones iniciales y de frontera lateral para realizar simulaciones o predicciones a 12, 24, 36...120 horas, etc. En el presente trabajo se utilizaron datos de los análisis globales del NCEP, para generar la condición inicial del modelo (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data/>). De igual forma se utilizaron los análisis globales del NCEP, para actualizar las condiciones de frontera lateral del modelo cada seis horas durante el periodo de integración, pues no se pudo disponer de datos de pronóstico sin costo para casos históricos, ya que en forma operacional, los datos de pronóstico solamente se encuentran disponibles para las últimas 72 horas diariamente (<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>).

Las variables necesarias para el MM5 son:

- Componente zonal y meridional (“u” y “v”) del viento.
- Temperatura del aire.
- Humedad relativa.
- Presión reducida a nivel del mar.
- Altura geopotencial.

Todas las variables se obtuvieron en 17 niveles de presión: 975, 925, 900, 850, 800, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200 y 100 mb, con excepción de la humedad relativa que sólo reporta hasta el nivel de 300 mb. Para la asimilación de datos en el análisis objetivo (LITTLE_R) se obtuvieron:

- Datos diarios de la TSM (<ftp://polar.wwb.noaa.gov/pub/history/sst>), con resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, implementados por NCEP a partir del 30 de enero del 2001, proveyendo la TSM diaria para el modelo Meso-Eta. Estos datos se actualizaron cada seis horas durante el periodo de integración.

- Datos de viento derivados por satélite (QuikScat). Proporciona información de las componentes zonal y meridional del viento a 10 metros de la superficie del mar, con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (<http://poet.jpl.nasa.gov/>).
- Observaciones de radiosondeo (<http://raob.fsl.noaa.gov/>) de las estaciones localizadas en las regiones de estudio con las siguientes variables: altura geopotencial, temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, dirección e intensidad del viento.
- Datos de temperatura, presión, humedad relativa, dirección y velocidad del viento de las estaciones meteorológicas automáticas de superficie de la Secretaría de Marina.
- Datos de superficie, barcos y boyas obtenidos por NCAR (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds464.0/data/>).

El proceso de asimilación de datos consiste en una serie de pasos entre los que destacan el control de calidad, filtrado de datos equivocados y suavizamiento e interpolación de los datos observados. En el programa de preprocesamiento LITTLE_R, se consideró un nivel de tolerancia del treinta por ciento en el control de calidad entre los datos observados y los datos de análisis utilizados para la condición inicial. Se utilizó el análisis objetivo tipo Cressman, que se basa en un radio de influencia anisotrópico para modificar los valores de puntos de malla del análisis alrededor de cada observación.

2.4 Estrategia de los experimentos

Además de utilizar altas resoluciones espaciales en los modelos de pronóstico, otro acercamiento que ha mostrado gran efectividad, son los ensambles de modelos con baja resolución espacial. Algunos estudios han demostrado que los ensambles de pronóstico con modelos de baja resolución espacial, tienen una mayor habilidad en el pronóstico, que un solo pronóstico individual de alta resolución espacial. Esto ya ha sido verificado sobre una amplia muestra de estudios (i.e., Stensrud et al., 1999; Wandishin et al., 2001; Gritmit y Mass, 2002). Por ejemplo, para un periodo de seis meses sobre el Pacífico noroeste, Gritmit y Mass (2002), demostraron que un ensamble de 5 miembros con el MM5, y una resolución espacial de 12 kilómetros, fue tan hábil como un solo pronóstico determinístico de 4 kilómetros de resolución espacial. Por otro lado, se ha demostrado también que un número de entre ocho o diez integrantes es suficiente para obtener los beneficios del pronóstico por ensamble (Leith, 1974; Toth y Kalnay, 1997; Buizza y Palmer, 1998).

La metodología de ensamble se desarrolla al hacer variaciones en la condición inicial, parametrizaciones físicas, empleando diferentes modelos o cualquier combinación de estas. Krishnamurti (2003), menciona que si solamente estuvieran disponibles los pronósticos de un solo modelo, es posible construir un ensamble a partir de este. La metodología de ensamble busca incrementar la habilidad en el pronóstico al combinar información independiente de los miembros individuales. Sin embargo, queda un número importante de preguntas por resolver.

- ¿Cuál es la mejor forma de construir un ensamble? Existen muchas formas de variar la condición inicial, pero el método óptimo para lograr esto no ha sido definitivamente determinado.
- ¿Cuáles son las escalas temporales más convenientes para los ensambles? Típicamente los ensambles se han utilizado para pronósticos a medio alcance y mayores (Palmer, 2002), aunque Stensrud et al., (1999) y Elmore et al., (2002), han presentado evidencia de que los pronósticos a corto alcance pueden también ser beneficiados con la metodología de ensamble.

- ¿Cuál es la mejor forma de producir pronósticos probabilísticos a partir de la salida del ensamble? Aunque los ensambles están bien diseñados para generar pronósticos probabilísticos, la precisión de los pronósticos puede estar comprometida por errores sistemáticos del modelo⁶. Si fuera el caso, la salida del modelo necesitaría ser corregida antes de producir pronósticos probabilísticos. Con técnicas de procesamiento estadístico se pueden corregir estas deficiencias.
- ¿Cuál es la fuente de una pobre dispersión entre los miembros del ensamble, y cómo puede ser corregida lo mejor posible? La cobertura de las soluciones de un ensamble, no es, en todos los casos, suficientemente amplia para abarcar a la solución. Por ejemplo, un evento de precipitación intensa puede no ser capturado por ningún miembro del ensamble, aún cuando se utilicen diferentes modelos, diversas opciones físicas ó diferentes condiciones iniciales. La inhabilidad de un ensamble para pronosticar se cree que está ligada a una pobre dispersión entre las soluciones (Hamill y Colucci, 1998; Stensrud et al., 1999), aunque al incrementar la dispersión, también puede llevar a un deterioramiento en la habilidad predictiva (Wandishin et al., 2001).

En el presente trabajo, se construyeron tres ensambles para casos de ciclones tropicales cercanos a México. La configuración de cada uno de ellos se describe a continuación:

2.4.1 Huracán “Marty”

Se seleccionó “Marty” por ser un huracán de la temporada 2003 del Pacífico Oriental (18 al 26 de septiembre), que se desplazó paralelamente a la costa occidental del territorio nacional, internándose en aguas del Mar de Cortés hasta llegar a la región noroeste del estado Sonora, dejando a su paso pérdidas de vidas humanas y económicas. Lo que se busca en este caso, es ver la habilidad del modelo para

⁶ Error sistemático del modelo.- Correspondencia entre el promedio de los pronósticos y el promedio de las observaciones. Un ejemplo de las preguntas que normalmente se hacen es: ¿Son los pronósticos de precipitación constantemente sobreestimados?

pronosticar la trayectoria de “Marty” paralela a la costa del Pacífico Mexicano. Se conformó un ensamble de 18 miembros. Diferentes condiciones iniciales se crearon al hacer combinaciones en la física del modelo y con el esquema de asimilación de datos. No se hizo asimilación de datos en el experimento de control para ver el impacto de las observaciones en el pronóstico. En la tabla 3, se muestran las opciones físicas y esquemas de asimilación de datos de cada uno de los miembros individuales.

Exp.	Esquema de humedad	Parametrización de cúmulus	Esq. de capa límite	Datos asimilados
Ctrol.	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	No se asimilaron datos.
2	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo y QuikScat.
3	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, QuikScat, boyas, barcos
4	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
5	Mixed Phase	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo y QuikScat.
6	Mixed Phase	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, QuikScat, boyas, barcos
7	Mixed Phase	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
8	Warm Rain	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo y QuikScat .
9	Warm Rain	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, QuikScat, boyas, barcos
10	Warm Rain	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
11	Warm Rain	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo y QuikScat.
12	Warm Rain	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, QuikScat, boyas, barcos
13	Warm Rain	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
14	Simple Ice	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo y QuikScat.
15	Simple Ice	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, QuikScat, boyas, barcos
16	Simple Ice	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
17	Simple Ice	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo y QuikScat.
18	Simple Ice	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.

Tabla 3. Opciones físicas y esquemas de asimilación de datos de los miembros del ensamble. Caso “Marty”.

Se configuró un solo dominio de 30 kilómetros de resolución horizontal, de 110 puntos de malla en “i” por 130 puntos de malla en “j”, centrado en latitud 20° N y longitud 100° W (Fig. 11). La integración se llevó a cabo con un paso de tiempo de 90 segundos para cinco días de pronóstico, que comprende del 20 (00 “Z”) al 25 (00 “Z”) de septiembre. Los 17 niveles de presión se interpolaron a 23 coordenadas verticales sigma. Se consideró este periodo para ver el desempeño del ensamble en pronosticar la intensificación del ciclón tropical a la categoría de huracán, 24 horas después de la condición inicial, así como su disipación sobre la región noroeste del país el día 25 de septiembre.

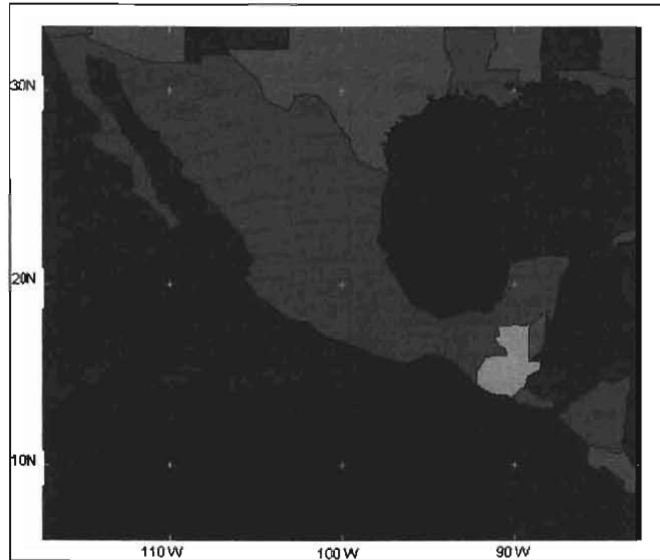


Figura 11. Cobertura geográfica del dominio para el pronóstico por ensamble del huracán “Marty” del Pacífico.

2.4.2 Huracán “Marty” (con vórtice artificial)

Se conformó un ensamble de 10 miembros. La perturbación se incorporó al variar las opciones físicas del modelo. Con excepción del experimento de control, todos los miembros contienen los mismos datos asimilados, pues se considera que deben de partir de una condición inicial lo más cercanamente posible a la “realidad” (ver tabla 4).

Exp.	Esquema de humedad	Parametrización de Cúmulus	Esquema de capa límite	Datos asimilados
Ctrol.	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	No se asimilaron datos.
2	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
3	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
4	Simple ice	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
5	Simple ice	Kain Fritsch 2	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
6	Simple ice	Kain Fritsch 2	Burk Thompson	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
7	Simple ice	Kain Fritsch 2	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
8	Warm Rain	Anthes Kuo	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
9	Mixed Phase	Anthes Kuo	Burk Thompson	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
10	Mixed Phase	Anthes Kuo	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.

Tabla 4. Opciones físicas y esquemas de asimilación de datos de los miembros del ensamble. Huracán “Marty” (con vórtice artificial).

Se configuró un solo dominio de 15 kilómetros de resolución horizontal, de 160 puntos de malla en “i” por 130 puntos de malla en “j”, centrado en latitud 24° N y longitud 109° W. Según Davis (2001), es conveniente utilizar una resolución de entre 10 y 15 kilómetros para resolver la estructura del ojo y paredes del huracán, pues al disminuir la resolución, los vientos máximos subestimarán la intensidad de la tormenta. La integración del dominio se realiza con un paso de tiempo de 40 segundos para cinco días de pronóstico, que comprende del 20 (00 “Z”) al 25 (00 “Z”) de septiembre del 2003. Los 17 niveles de presión se interpolaron a 27 coordenadas verticales sigma, ya que con el uso de entre 25 y 30 coordenadas verticales sigma se obtienen predicciones más precisas (Davis, 2001).

Adicionalmente, se puso en aplicación el esquema de vórtices artificiales del MM5, con el fin de mejorar las predicciones en intensidad. En la figura 12, se puede apreciar el cambio en intensidad del campo de viento en superficie para la condición inicial, al insertar un vórtice artificial con una intensidad cercana a la de la tormenta observada. En este segundo caso, no se asimilaron datos de viento derivado por satélite ya que modifica el campo de viento ajustado por el vórtice artificial.

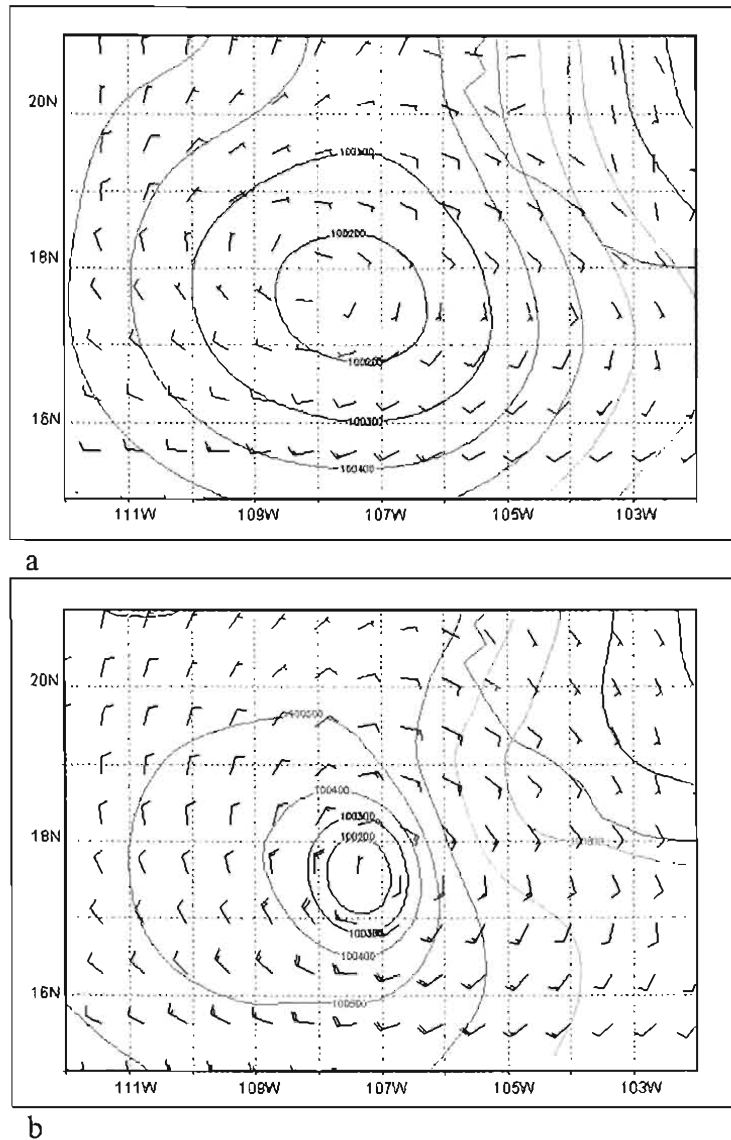


Figura 12. Cambio en intensidad del campo de viento en superficie al insertar un vórtice artificial en la condición inicial. (a) Sin vórtice artificial (b) Con vórtice artificial (barbas de viento en m/s).

2.4.3 Huracán “Iván”

Se seleccionó “Iván” por ser un huracán mayor de la temporada de ciclones tropicales 2004 del Atlántico (2 al 26 de septiembre), que recurvó en inmediaciones del Canal de Yucatán hacia el Golfo de México, y que alcanzó durante su periodo de vida, en tres ocasiones, la categoría de huracán categoría 5 de la escala Saffir-Simpson. Lo que se busca en este caso, es ver la habilidad del ensamble en pronosticar el recurvamiento del ciclón tropical hacia el Golfo de México –como ocurrió-, ó en su

caso, lo lleva a la Península de Yucatán. En un segundo plano, se verá la capacidad del ensamble para pronosticar las intensidades alcanzadas por “Iván”. Se conformó un ensamble de 10 miembros. La perturbación se incorporó al variar las opciones físicas del modelo, y al igual que en el caso anterior, todos los miembros del ensamble tienen en la condición inicial datos asimilados de radiosondeo, estaciones de superficie, barcos y boyas, con excepción del experimento de control (ver tabla 5).

Exp.	Esquema de humedad	Parametrización de Cúmulus	Esq. de capa límite	Datos asimilados
Ctrol.	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	No se asimilaron datos.
2	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Radioondeo, boyas y barcos.
3	Mixed Phase	Betts/Miller	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
4	Simple ice	Betts/Miller	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
5	Simple ice	Kain Fritsch 2	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
6	Simple ice	Kain Fritsch 2	B. Thompson	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
7	Simple ice	Kain Fritsch 2	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
8	Warm Rain	Anthes Kuo	Blackadar	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
9	Mixed Phase	Anthes Kuo	B. Thompson	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.
10	Mixed Phase	Anthes Kuo	MRF	Est. Sup., radiosondeo, boyas y barcos.

Tabla 5. Opciones físicas y esquemas de asimilación de datos de los miembros del ensamble. Caso “Iván”.

Se configuró un solo dominio de 20 kilómetros de resolución horizontal, de 145 puntos de malla en “i” por 170 puntos de malla en “j”, centrado en latitud 22° N y longitud 083° W (Fig. 13). La integración se realiza con un paso de tiempo de 60 segundos para cinco días de pronóstico, que comprende del 11 (00 “Z”) al 16 (00 “Z”) de septiembre del 2004. Los 17 niveles de presión se interpolaron a 27 coordenadas verticales sigma, y se puso en aplicación el esquema de vórtices artificiales del MM5 en la condición inicial.

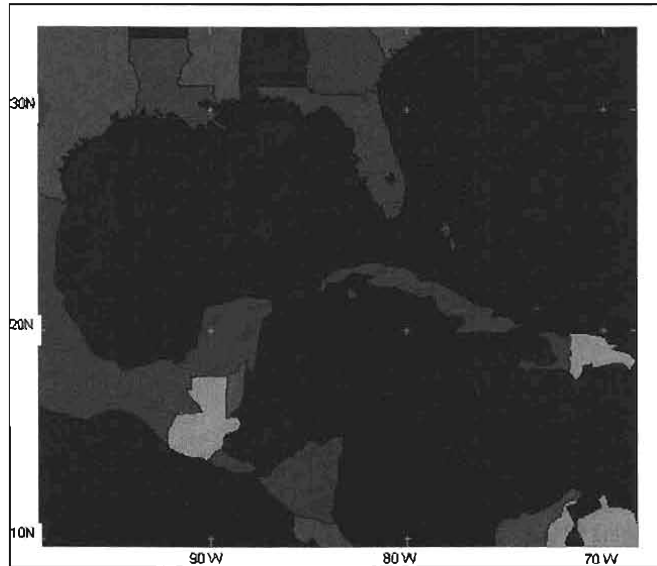


Figura 13. Cobertura geográfica del dominio para el pronóstico por ensamble de "Iván" en el Atlántico.

2.5 Metodología de verificación de los resultados

En la presente sección se explica la metodología empleada para la verificación de los resultados, donde el objetivo es comparar la media del ensamble en contra de los pronósticos individuales. Siguiendo la metodología de Kalnay (2000), donde se emplean los análisis operacionales del modelo ETA para la verificación de los pronósticos de altura geopotencial, temperatura y humedad, en lugar de observaciones; en el presente trabajo se utilizan los análisis finales del NCEP para la verificación de los pronósticos de presión en superficie.

Ya que la verificación implica campos atmosféricos bidimensionales, se inicia con la ampliamente conocida medida del error promedio, usualmente conocida como error cuadrático medio (mse, por sus siglas en inglés). Si "x" es una sola variable del pronóstico y "v" el correspondiente análisis que verifica, el mse se define (Wilks, 1995) como:

$$\text{mse} = \overline{(x_{i,j} - v_{i,j})^2}^{i,j} \quad (2.9)$$

Donde la barra indica el promedio del dominio. Así mismo, el error cuadrático medio se puede descomponer en dos partes: 1) error sistemático del dominio (bias, por sus siglas en inglés) al cuadrado, y 2) error de varianza [desviación estándar del error (sde, por sus siglas en inglés), al cuadrado]. La varianza a su vez, se puede descomponer en componentes sistemáticos y aleatorios, de acuerdo con Takacs (1985) y Murphy (1988):

$$\text{mse} = \text{bias}^2 + \text{sde}^2 = \text{mnbias}^2 + \text{sdbias}^2 + \text{disp}^2 \quad (2.10)$$

donde:

$$\text{mnbias} = \overline{x_{i,j}} - \overline{v_{i,j}} = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (x_{i,j} - v_{i,j}),$$

$$\text{sde} = \sqrt{\frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (x_{i,j} - v_{i,j})^2},$$

$$r(x, v) = \frac{\sqrt{\frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{i,j} v_{i,j}}}{\text{sd}(x) \text{sd}(v)},$$

$$\text{sdbias} = [\text{sd}(x) - \text{sd}(v)], \text{ y}$$

$$\text{disp}^2 = 2 [1 - r(x, v)] \text{sd}(x) \text{sd}(v) \quad (2.11)$$

De aquí que $x'_{i,j} = x_{i,j} - \overline{x_{i,j}}$, $v'_{i,j} = v_{i,j} - \overline{v_{i,j}}$, "sd" es la desviación estándar con respecto a la media del campo pronosticado, ó la media del análisis que verifica, y "r(x,v)" es el coeficiente de correlación (corr), entre el pronóstico y los análisis que verifican. La ecuación 2.11 mide el error de dispersión (disp), **y puede ser considerada la medida más importante de la habilidad en el pronóstico** (Kalnay, 2000).

- Se elaboraron series de tiempo en periodos de 12 horas, de los errores de dispersión de los pronósticos del ensamble para la variable presión atmosférica. Estas series de tiempo incluyen la condición inicial, que no es representativa de los errores en el pronóstico, sino de las opciones utilizadas en la condición inicial.
- Se compararon los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas del ensamble, con los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas automáticas de superficie de la Secretaría de Marina.

Capítulo III

Simulaciones – Pronóstico de huracanes

3.1 Huracán “Marty”

3.1.1 Descripción sinóptica

“Marty” se desarrolló a partir de una onda tropical que se movió a la región del Pacífico nororiental proveniente de Centroamérica el 10 de septiembre del 2003. La convección asociada con la onda tropical se volvió más persistente el día 16 de septiembre, cuando se localizaba al Sur de Manzanillo, Col. Para el día 18, la actividad que acompañaba a la onda estaba mejor organizada, y por la tarde de ese día se desarrolló la depresión tropical “Trece-E”, cuando se localizaba aproximadamente a 230 m.n. (426 km) al suroeste de Manzanillo, Col., caracterizada por un centro de baja presión de 1002 mb, vientos máximos sostenidos de 30 nudos (56 km/h), rachas de 40 nudos (74 km/h) y desplazamiento hacia el oeste-noroeste.

Las observaciones meteorológicas desde un buque⁷ a las 01:00 “R” (06:00 “Z”) del 19 de septiembre, contribuyó a la decisión del Centro Nacional de Huracanes de Miami, Florida, de llevar a Marty a la categoría de tormenta tropical. Por la mañana del 20 de septiembre, la intensa actividad convectiva comenzó a tener mejor organización conforme el sistema se desplazaba lentamente hacia el oeste-noroeste. Por la noche de ese mismo día (Fig. 14), “Marty” se intensificó a huracán categoría 1 de la escala de intensidades Saffir-Simpson, cuando se localizaba en latitud 18.6° N y longitud 108.6° W, caracterizado por un centro de baja presión de 987 mb, vientos máximos sostenidos de 65 nudos (120 km/h) y rachas de 80 nudos (148 km/h).

⁷ Identificador del buque “4XFP”.- Reporte del 19/0600 UTC (01:00 “R”), en situación geográfica lat. 18.2°N, long. 104.1°W; velocidad del viento 35 nudos (65 km/h), presión atmosférica 1006 mb. Fuente: Centro Nacional de Huracanes de Miami, Florida.

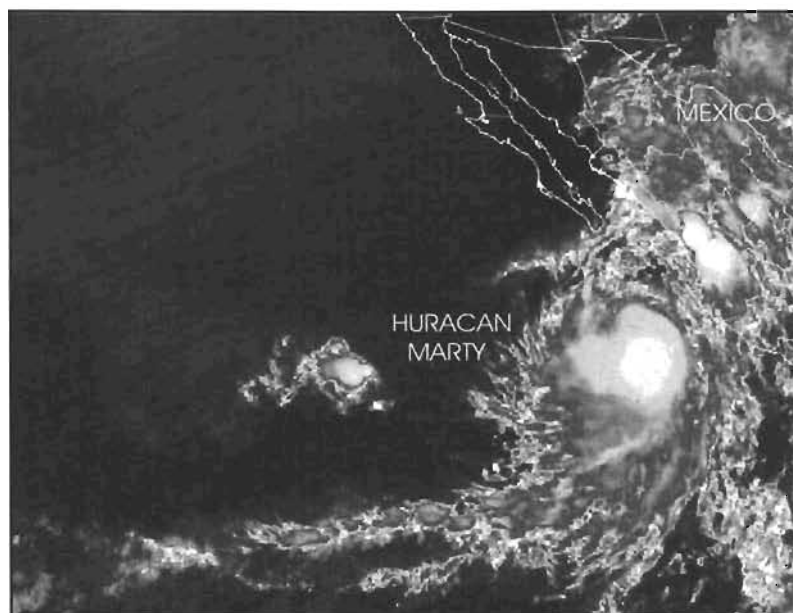


Figura 14. Imagen de satélite en infrarrojo del huracán “Marty” (21 de septiembre del 2003 01:00 “Z”).

Al final del 21 de septiembre, el centro del ciclón tropical se localizaba a 90 m.n. (167 km) al sur-sureste de Cabo San Lucas, B.C.S., caracterizado por un centro de baja presión de 980 mb, vientos máximos sostenidos de 75 nudos (139 km/h) y rachas de 90 nudos (167 km/h). “Marty” continuó intensificándose mientras se desplazaba con rumbo predominante hacia el nor-noroeste. Durante la madrugada del 22 de septiembre, cuando “Marty” se encontraba en latitud 22° N y longitud 109.6° W, alcanzó la intensidad de huracán categoría 2, con vientos máximos sostenidos de 85 nudos (157 km/h), rachas de 105 nudos (194 km/h) y una presión mínima de 973 mb. “Marty” mantuvo esta fuerza hasta que impactó en tierra aproximadamente a las 07:30 “R” (12:30 “Z”), al este de San José del Cabo, B.C.S. La interacción de “Marty” con la topografía del área lo debilitó, situándolo en la condición de huracán categoría 1.

“Marty” continuó desplazándose hacia el noroeste, paralelo a la costa oriental de la Península de Baja California y sobre aguas del Golfo de California. Debido a su rápido desplazamiento y cercanía con la costa, la noche del 22 “Marty” se degradó a tormenta tropical, cuando se localizaba sobre el Golfo de California aproximadamente a 74 m.n. (137 km) al norte de Santa Rosalía, B.C.S., y a 135 m.n. (250 km) al oeste-noroeste de Guaymas,

Son., caracterizado por un centro de baja presión de 990 mb, vientos máximos sostenidos de 60 nudos (111 km/h) y rachas de 75 nudos (139 km/h).

En el transcurso del 23 de septiembre, la tormenta tropical “Marty” continuó desplazándose con rumbo predominante hacia el nor-noroeste, disminuyendo la velocidad de desplazamiento y la intensidad de sus vientos. No obstante, continuó ocasionando fuertes lluvias que afectaron principalmente la porción occidental del país y que se extendieron hacia los estados de Arizona, Nuevo México y oeste de Texas en Estados Unidos. La convección profunda de la tormenta tropical comenzó a disminuir, por lo que la tarde del día 23, “Marty” se degradó a depresión tropical, cuando se localizaba a 73 m.n. (135 km) al Sur de Puerto Peñasco, Son., y a 82 m.n. (152 km) al Sureste de San Felipe, B.C.S., presentando vientos máximos sostenidos de 30 nudos (56 km/h), con rachas de 40 nudos (74 km/h) y una presión mínima de 1002 mb. Por la mañana del 24, la depresión tropical “Marty” tocó tierra sobre la costa noroeste de Sonora, con vientos máximos sostenidos de 25 nudos (46 km/h), rachas de 35 nudos (65 km/h) y una presión mínima de 1004 mb. Ya sobre tierra, la depresión tropical se degeneró en un sistema de baja presión, sin presentar actividad convectiva significativa, por lo que el día 26 se disipó al norte del estado de Sonora.

“Marty” fue un huracán categoría 2 cuando impactó en tierra al sur de la Península de Baja California, y depresión tropical cuando entró al norte del estado de Sonora, cerca la Bahía San Jorge. Este ciclón tropical presentó sus efectos más importantes en los estados de Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, con inundaciones que ocasionaron la pérdida de 12 vidas humanas distribuidas de la siguiente manera: 5 en Baja California Sur, 5 en Sonora y 2 en Sinaloa. Así mismo, se presentaron daños materiales en 4000 viviendas, vías de comunicación, regiones agrícolas y daños en la infraestructura de líneas de energía eléctrica y telefónica. Los registros de precipitación acumulada en 24 horas por efecto de este ciclón tropical se muestran en la tabla 6.

Fecha	Lugar	Precipitación acumulada en 24 hrs. (mm)
21 de septiembre 2003	Isla Socorro, Col.	122
22 de septiembre 2003	La Paz, B.C.S.	72
22 de septiembre 2003	Santa Rosalía, B.C.	80
22 de septiembre 2003	Topolobambo, Sin.	35

Tabla 6. Registros de precipitación acumulada en 24 horas por efecto del huracán “Marty” (de 00 “Z” a 00 “Z”).
(Fuente: Estaciones meteorológicas automáticas de la Secretaría de Marina.)

3.1.2 Descripción de la simulación

El periodo de evaluación de los pronósticos a 120 horas del huracán “Marty”, comprende del 20 (00:00 “Z”) al 25 (00:00 “Z”) de septiembre del 2003. Se calcularon los errores de dispersión de los pronósticos de presión en superficie, tomando como campo de verificación los análisis finales del NCEP. Por otro lado, se compararon los pronósticos de precipitación del ensamble, con observaciones de las estaciones meteorológicas automáticas de superficie de la Secretaría de Marina.

En la figura 15, se muestran los errores de dispersión de los miembros del ensamble para el pronóstico a 120 horas de la variable presión atmosférica en superficie, donde se aprecia el incremento en el tiempo de los errores de dispersión de los miembros del ensamble, debido al acrecentamiento de las diferencias entre los campos de presión que verifican, y los campos de presión pronosticados por el ensamble. Así mismo, se observa que la media del ensamble tiene en general los errores de dispersión más pequeños en relación a la mayoría de los miembros individuales, y de eso trata la metodología de ensamble, de aprovechar la información de cada uno de los miembros individuales para la obtención de un mejor pronóstico. Por otro lado, el error de dispersión en la condición inicial del experimento de control es cercano a cero, su explicación está en que no fue perturbado con datos asimilados en la condición inicial, por lo que las diferencias respecto al campo de presión que verifica no son grandes. Sin embargo esto

no es representativo de un buen o mal pronóstico, sino de las opciones utilizadas en la condición inicial.

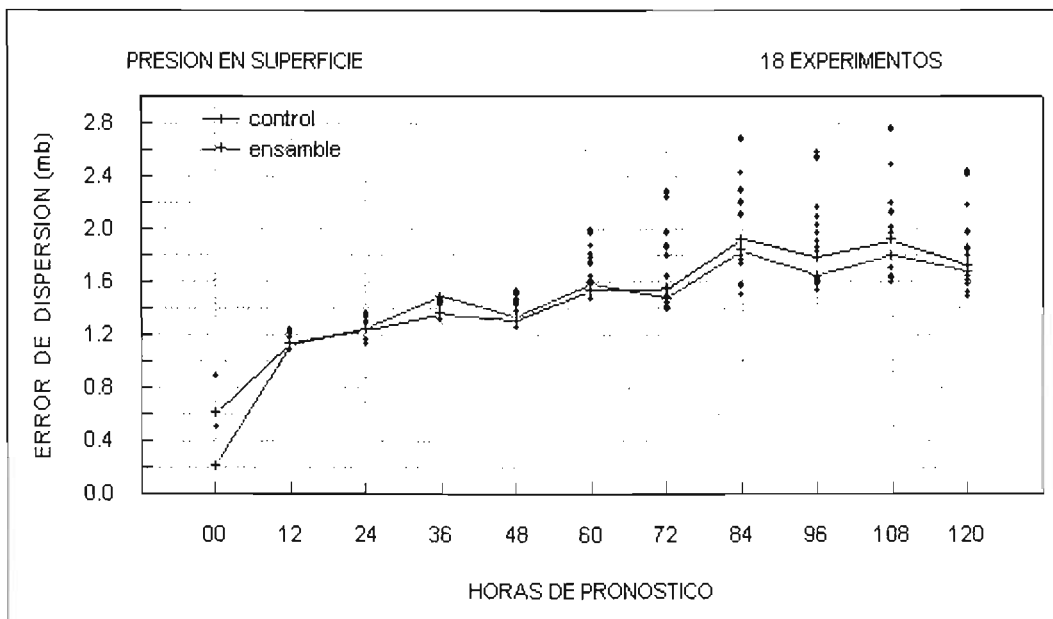


Figura 15. Errores de dispersión de los pronósticos del ensamble para la variable presión atmosférica en superficie. (Huracán "Marty").

En la figura 16, se muestran los gráficos de dispersión de los pronósticos de presión en superficie, donde los contornos de presión representan la media del ensamble –promedio de los valores pronosticados por los 18 miembros del ensamble-, y el sombreado en color la dispersión de los pronósticos con relación a la media del ensamble. En la condición inicial se puede observar que el valor de la dispersión sobre la región oceánica es menor a 4 milibares, pues no existen grandes diferencias entre los miembros del ensamble para la condición inicial. Sin embargo, a partir de las 72 horas de pronóstico, la dispersión de las soluciones se incrementa significativamente hasta las 120 horas de pronóstico, lo que representa un estado de creciente incertidumbre ó de menor confiabilidad en el pronóstico. Este incremento en la dispersión se hace evidente también en el gráfico de errores de dispersión, donde se puede apreciar claramente cómo los errores se incrementan significativamente a partir de las 72 horas de pronóstico.

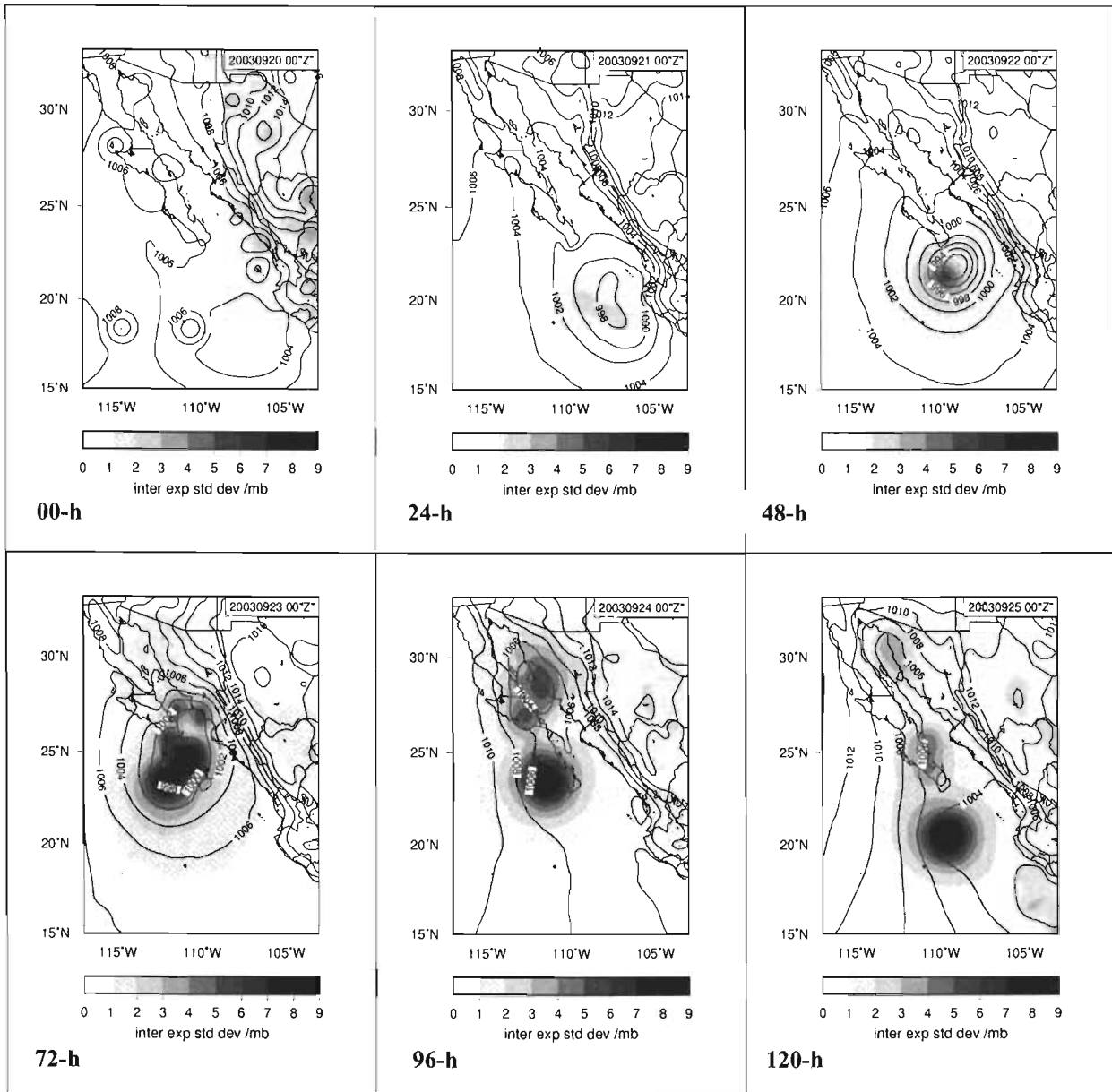


Figura 16. Gráficos de dispersión de los pronósticos de presión en superficie en milibares. (Huracán “Marty”).

Cuando se habla de dispersión de los pronósticos, quiere decir que los pronósticos individuales del ensamble no acuerdan en fijar un valor para la variable meteorológica pronosticada, y puede haber grandes diferencias entre cualesquiera miembros del ensamble. Para dejar más claro este concepto, en la figura 17, se muestra el campo observado de presión en superficie del día 25 de septiembre del 2003 a las 00:00 “Z”, cuando “Marty” se encontraba como una baja remanente sobre la región noroeste del estado de Sonora. En la misma figura se muestra también, el campo de presión pronosticado por uno de los dieciocho miembros del ensamble, para la misma fecha y hora que el campo observado, donde claramente se aprecia

un centro de baja presión al sur de la Península de Baja California, y por último, se muestra el campo de presión pronosticado por la media del ensamble, es decir, el promedio de los dieciocho campos de presión pronosticados por los miembros del ensamble, donde se aprecia un centro de baja presión frente a la costa del estado de Nayarit, y otro al norte del Mar de Cortés. Este es el significado de dispersión de los pronósticos, pues cuando en realidad “Marty” ya se encontraba como una baja remanente al noroeste del estado de Sonora, uno de los pronósticos individuales lo situó al sur de la Península de Baja California, y así como este miembro, otros miembros individuales lo situaron todavía más hacia el sur sobre la región oceánica y otros al norte del Mar de Cortés. Cuando se presenta una dispersión de tal magnitud, se habla de baja predictibilidad en el pronóstico, pues no hay certidumbre de lo que ocurrirá en el futuro.

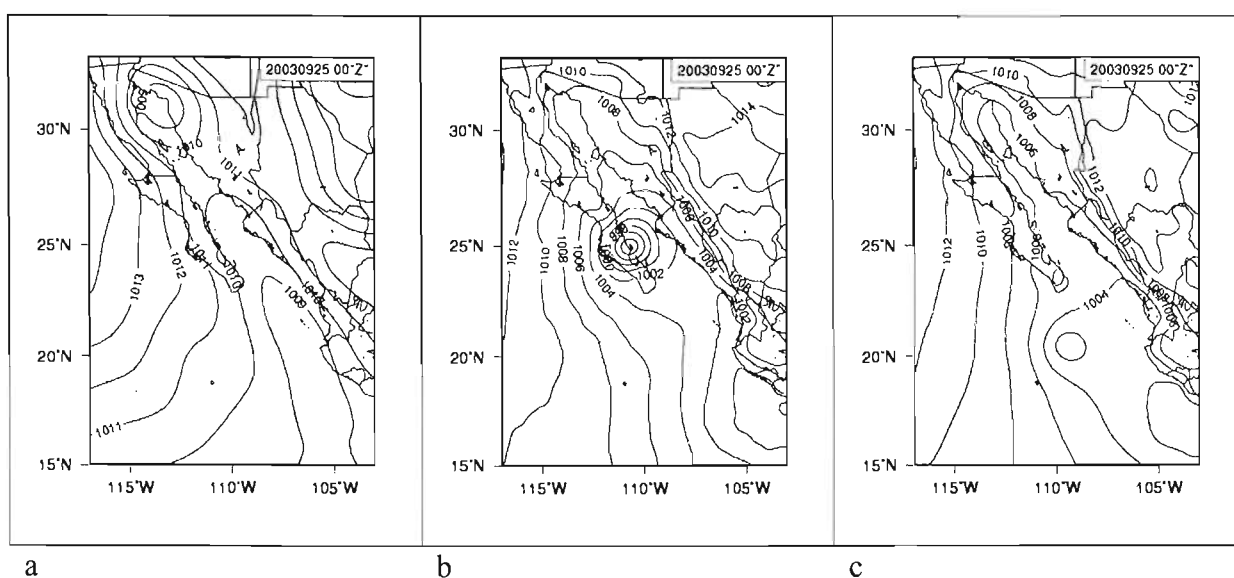


Figura 17. Representación de la dispersión de los pronósticos individuales. (a) Campo observado de presión en superficie. (b) Campo de presión pronosticado por uno de los dieciocho miembros del ensamble. (c) Media del ensamble. (mb)

El pronóstico de los valores mínimos de presión de “Marty” no fue el esperado, pues en un primer plano se presenta una diferencia entre el estado atmosférico “verdadero” –de acuerdo a las observaciones del NHC- y la condición inicial del modelo cercana a 4 milibares (error de análisis) (Fig. 18), que confirma que los vórtices contenidos en los análisis globales son extensos y débiles. Aún cuando se asimilaron datos de radiosondeo, viento derivado por satélite, estaciones de superficie, barcos y boyas, para ajustar la condición inicial lo más cercanamente posible a la atmósfera “verdadera”, no fue suficiente para un evento extremo

localizado sobre una región oceánica que carece de observaciones. Al presentarse un error de análisis en la condición inicial, la cobertura de las soluciones del ensamble no fue lo suficientemente amplia para abarcar a la solución. Sin embargo, la media del ensamble pronostica 12 horas después el punto de máxima intensidad del ciclón, y se podría decir que si bien los pronósticos no envolvieron a la solución, en general la media del ensamble tiene la misma tendencia que el campo observado.

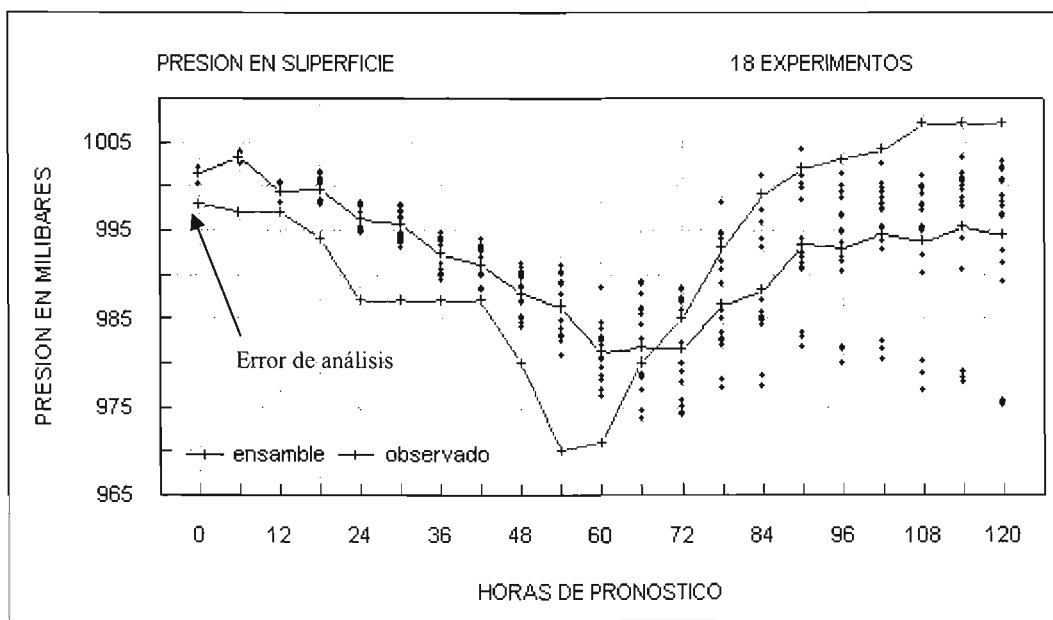


Figura 18. Valores mínimos de presión en superficie pronosticados por el ensamble y observaciones del NHC. (Huracán "Marty")

En la figura 19, se muestran los pronósticos de trayectoria de "Marty" de cada uno de los miembros del ensamble, obtenidos a partir de los puntos de mínima presión pronosticados. La media del ensamble tuvo un error promedio de 219 kilómetros en los pronósticos de posición para todo el periodo de evaluación. Es claro el efecto que tiene la dispersión de los pronósticos individuales en el pronóstico de la media del ensamble, principalmente en las últimas horas de pronóstico cuando la dispersión de los pronósticos se incrementa considerablemente.

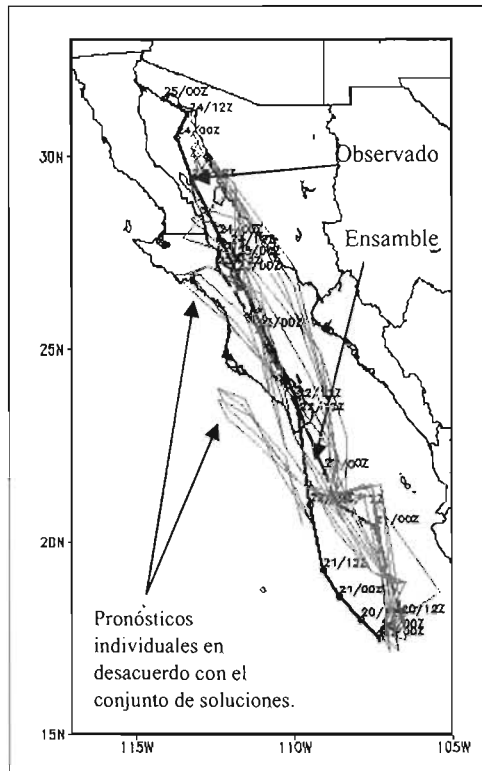


Figura 19. Trayectorias pronosticadas por el ensamble y trayectoria observada por el NHC. (Huracán “Marty”).

Los pronósticos de intensidad máxima del viento en superficie tampoco fueron los esperados, pues el error de análisis en la condición inicial –de 13 m/s –, es también para esta variable, la causa de que la cobertura de las soluciones del ensamble no envolviera a la solución (Fig. 20). Por otro lado, ninguno de los miembros del ensamble intensificó al ciclón tropical a la categoría de huracán –intensidad del viento por arriba de 33 m/s –, aún en la etapa de mayor intensidad cuando “Marty” era un huracán categoría 2.

Lo anterior confirma que la predictibilidad de los pronósticos numéricos del tiempo, está limitada principalmente por diferencias entre el estado atmosférico “verdadero”, y la condición inicial de los modelos de predicción numérica del tiempo, es decir, el “error de análisis”.

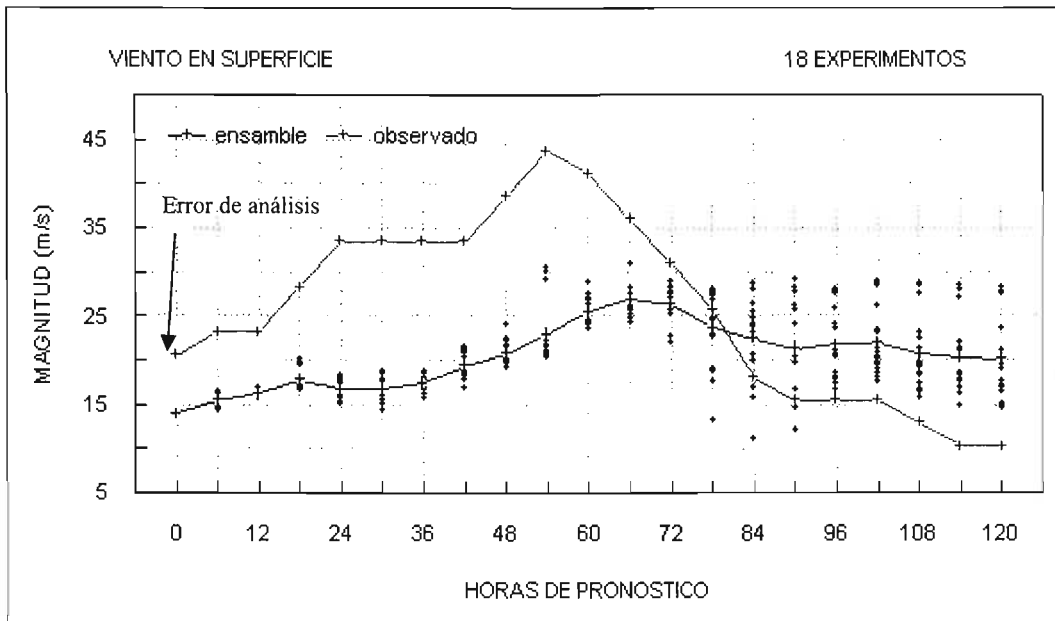


Figura 20. Valores máximos de magnitud del viento en superficie pronosticados por el ensamble y observaciones del NHC. (Huracán "Marty")

Con excepción de los buques en la mar o actividades marítimas como plataformas de perforación petrolera –que más bien son afectados por viento y oleaje-, la precipitación ocasionada por un ciclón tropical es donde más gente resulta afectada. Debido a una mayor conciencia en la gente sobre eventos meteorológicos extremos, y mejores advertencias de amenaza de marea de tormenta, los Estados Unidos casi no han experimentado por este efecto pérdidas de vidas humanas en los últimos años, que es la causa principal de muertes en otras áreas del mundo. Sin embargo, la mayoría de las muertes en Estados Unidos asociadas a casos de huracanes se deben a inundaciones súbitas, que es una amenaza que puede continuar días después de la entrada a tierra del fenómeno hidrometeorológico, y cuando la atención de los medios de comunicación ha disminuido (Elsberry, 2002).

En años recientes han habido diversos estudios que discuten el desempeño del ensamble para los pronósticos de precipitación (i.e., Du et al., 1997; Ebert, 2001; Zhang y Krishnamurti, 1997), donde la mayoría de ellos demuestran que el promedio de los pronósticos de precipitación de los miembros del ensamble (la media del ensamble), proporciona resultados más precisos que el pronóstico de precipitación de un solo miembro individual (Chien, 2002).

Los pronósticos de precipitación se obtuvieron al promediar los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas de los 18 miembros individuales del ensamble. Para su verificación, se obtuvieron los registros de precipitación de las Estaciones Meteorológicas Automáticas de Superficie (EMAS) de la Secretaría de Marina, emplazadas en Isla Socorro, Col.; La Paz, B.C.S.; Santa Rosalía, B.C. y Topolobampo, Sin., para los días 21 y 22 de septiembre del 2003.

En tres de las cuatro estaciones, los pronósticos de la media del ensamble sobreestimaron la cantidad de lluvia acumulada en 24 horas (Fig. 21). No obstante, acordando con Chien (2002), los pronósticos de la media del ensamble proporcionaron resultados más precisos que los pronósticos individuales, pues en algunos casos quedan muy por arriba de las observaciones, como es el caso de La Paz, donde uno de los miembros individuales pronostica más de 500 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas.

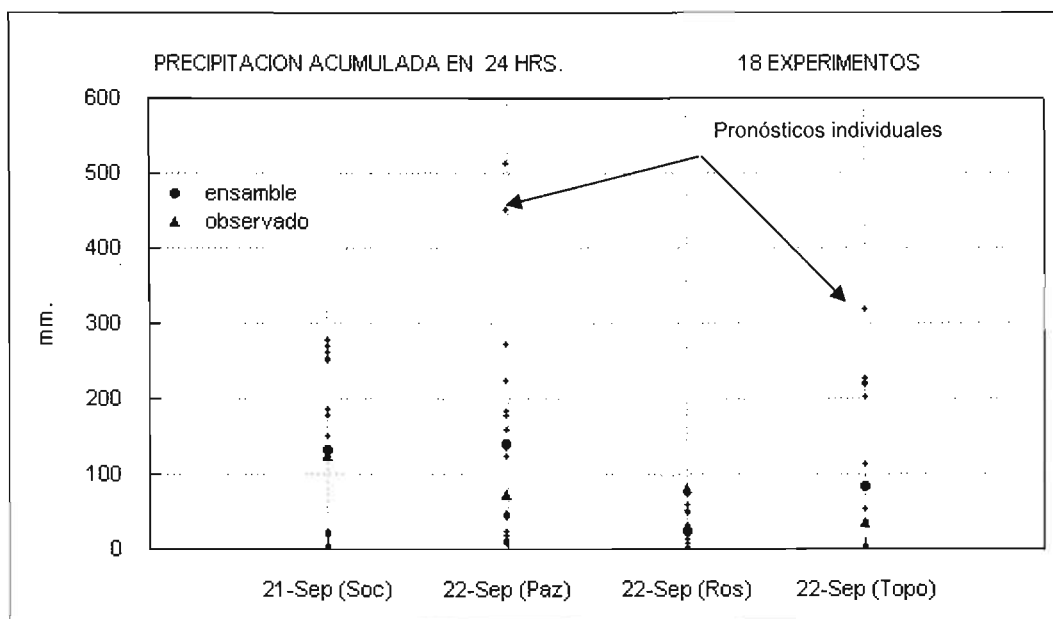


Figura 21. Pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas por el ensamble y observaciones de estaciones de superficie de Isla Socorro (Soc); La Paz, B.C.S. (Paz); Santa Rosalía, B.C. (Ros) y Topolobampo, Sin. (Topo).

Aunque los pronosticadores tradicionalmente han visto la predicción del tiempo en forma determinística, una cultura de cambio hacia pronósticos probabilísticos está en progreso. Sin embargo, aún es necesario demostrar a los usuarios de la información meteorológica, que la confiabilidad de los pronósticos probabilísticos son de mayor valor que imperfectos pronósticos determinísticos. Un pronóstico probabilístico puede ser de gran utilidad para la emisión de advertencias de inundación, cuando exista una alta probabilidad de que una determinada cantidad precipitación –umbral amenaza- pueda ocasionar el desbordamiento de un río cercano a una población. El valor del umbral amenaza depende de la vulnerabilidad de la región bajo observación.

En la figura 22, se muestran pronósticos probabilísticos de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas –umbral de lluvias fuertes-, donde se puede estimar qué regiones tienen mayor probabilidad de ocurrencia de este evento. Para los días 21 y 22 de septiembre -periodo de mayor intensidad del ciclón tropical-, las probabilidades más altas se presentaron en los lugares donde se obtuvieron los registros de precipitación, y conforme la intensidad pronosticada del ciclón tropical disminuye, la probabilidad de precipitación de lluvias fuertes lo hace también.

Los pronósticos probabilísticos obtenidos a partir de la salida del ensamble, son muy útiles para la evaluación de riesgos y toma de decisiones, pues proporcionan información acerca de la incertidumbre asociada a una variable meteorológica y que puede ser expresada en términos de dispersión de los pronósticos ó en términos de probabilidad.

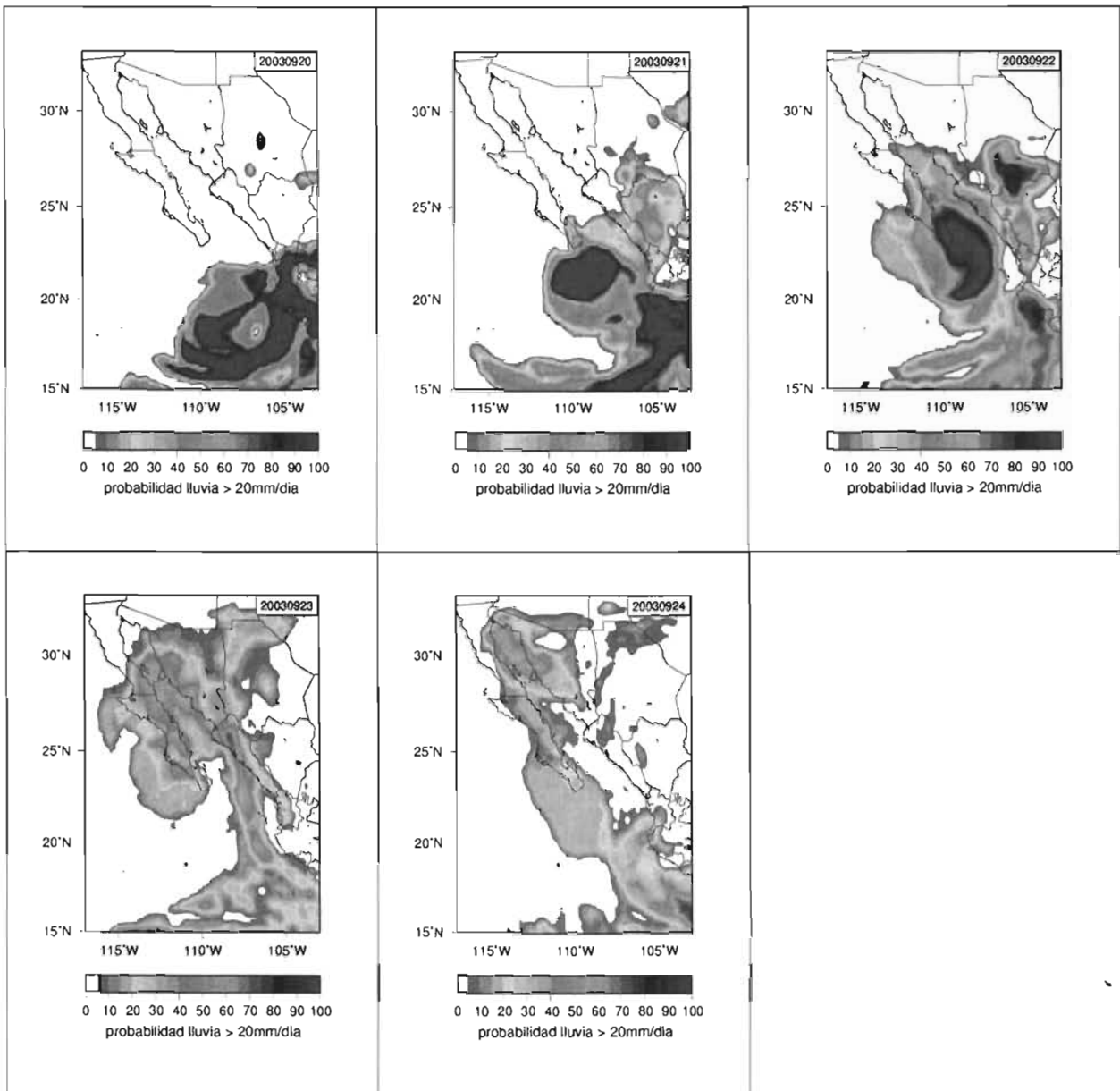


Figura 22. Pronósticos probabilísticos de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas. (Huracán "Marty").

3.1.3 Importancia de la condición inicial.

El problema del pronóstico numérico del tiempo es de condición inicial, y resulta complicado obtener pronósticos precisos al tener errores de análisis que inherentemente fijan un límite en la predictibilidad. Para el caso de pronósticos de ciclones tropicales, se propone la inserción de un vórtice artificial en la condición inicial cuya intensidad sea cercana a la de la tormenta observada, de esta forma, se espera reducir el error de análisis y por consiguiente obtener un mejor pronóstico.

3.2 Huracán “Marty” (con vórtice artificial)

3.2.1 Descripción de la simulación

Motivado por los resultados obtenidos en el caso anterior, se llevó a cabo una segunda etapa de experimentos con “Marty”, teniendo como variantes la aplicación de un vórtice artificial cercano a la intensidad observada de la tormenta en la condición inicial, y el incremento tanto en la resolución espacial del dominio, como en las coordenadas verticales sigma en la capa límite. Se creó un ensamble de 10 integrantes, pues el costo de cómputo de 18 fue alto.

En la figura 23, se muestra el gráfico de errores de dispersión de los pronósticos del ensamble, para la variable presión atmosférica en superficie, donde la media del ensamble se mantiene entre los miembros con menores errores de dispersión durante todo el periodo de evaluación. Por otro lado, el experimento de control parte de un error cercano a cero en la condición inicial –pues no fue perturbado con asimilación de datos–, pero quedó entre los miembros del ensamble con mayores errores de dispersión. Este resultado se atribuye a una mejor técnica de asimilación de datos en la condición inicial de los demás miembros del ensamble. A las 84 horas de pronóstico, se presenta un valor máximo de los errores de dispersión para todos los miembros del ensamble, pues como se verá más adelante, coincide con la máxima dispersión alcanzada entre las soluciones del ensamble en las 120 horas de pronóstico. Al final del periodo de evaluación, se puede ver que los errores de dispersión disminuyen considerablemente, ya que los miembros del ensamble acuerdan en llevar a “Marty” a la región noroeste del país, por lo tanto no existe gran dispersión entre los miembros individuales, que habla de mayor predictibilidad.

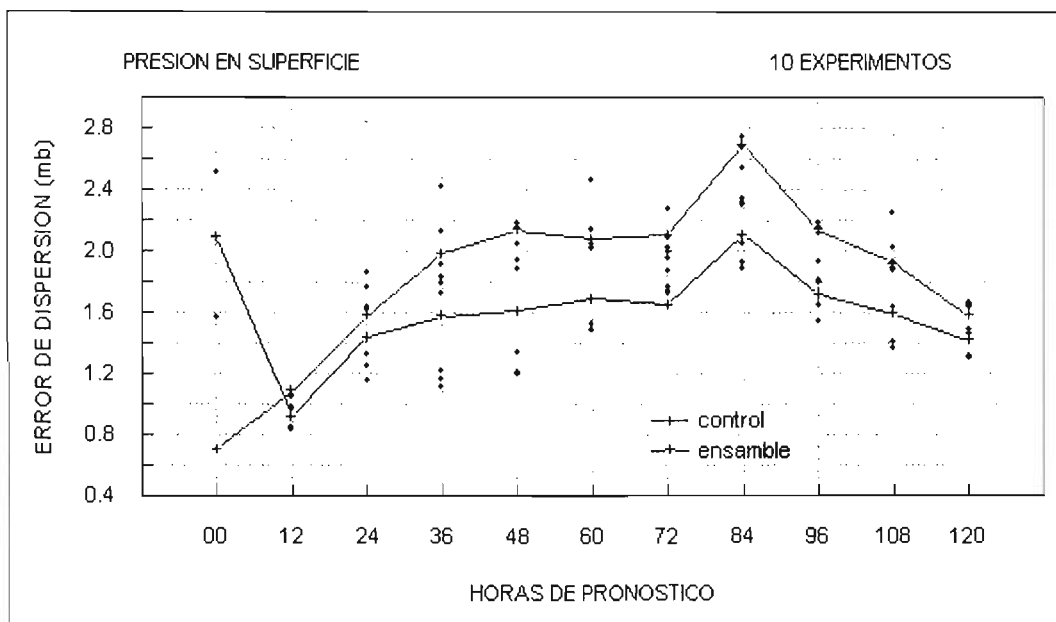


Figura 23. Errores de dispersión de los pronósticos del ensamble para la variable presión atmosférica en superficie. [Huracán “Marty” (con vórtice artificial)].

En la figura 24, se muestran los gráficos de dispersión de los pronósticos de presión atmosférica en superficie. Se puede observar que en la condición inicial prácticamente no hay dispersión entre los miembros del ensamble, pues nueve de los diez miembros individuales parten de la misma condición inicial, con excepción del experimento de control donde no se hizo asimilación de datos. La perturbación en el ensamble se integró al hacer variaciones en las opciones físicas del modelo para cada uno de los miembros individuales. A las 48 horas de pronóstico el valor de la dispersión se incrementa significativamente, que coincide con el momento en el que el ciclón tropical alcanza su mayor intensidad pronosticada. Esto quiere decir que algunos miembros del ensamble no acuerdan en pronosticar la intensificación del ciclón tropical, por lo que las diferencias con respecto a los miembros que si acuerdan en intensificarlo se hacen más grandes, y esto es representativo de que la incertidumbre está fuertemente ligada al pronóstico de eventos extremos. A las 120 horas de pronóstico, el valor de la dispersión disminuye significativamente, ya que los miembros del ensamble acuerdan en llevar a “Marty” a la región noroeste del país, y en su debilitamiento.

Lo más importante en este segundo caso, es que todas las soluciones del ensamble acuerdan en llevar a “Marty” a la región noroeste del país donde entró en etapa de disipación,

y que la escasa dispersión entre las soluciones del ensamble habla de mayor predictibilidad - situación muy diferente al primer caso-. Este resultado se atribuye a que los miembros del ensamble partieron de una mejor condición inicial, producto de la puesta en aplicación de un vórtice artificial cercano a la intensidad observada de la tormenta, y de una mejor técnica de asimilación de datos. El efecto de una mejor técnica de asimilación de datos se observa en la homogeneidad del campo de presión de la condición inicial, pues en el primer caso las observaciones quedaron como objetos individuales que no se integraron al campo de trasfondo.

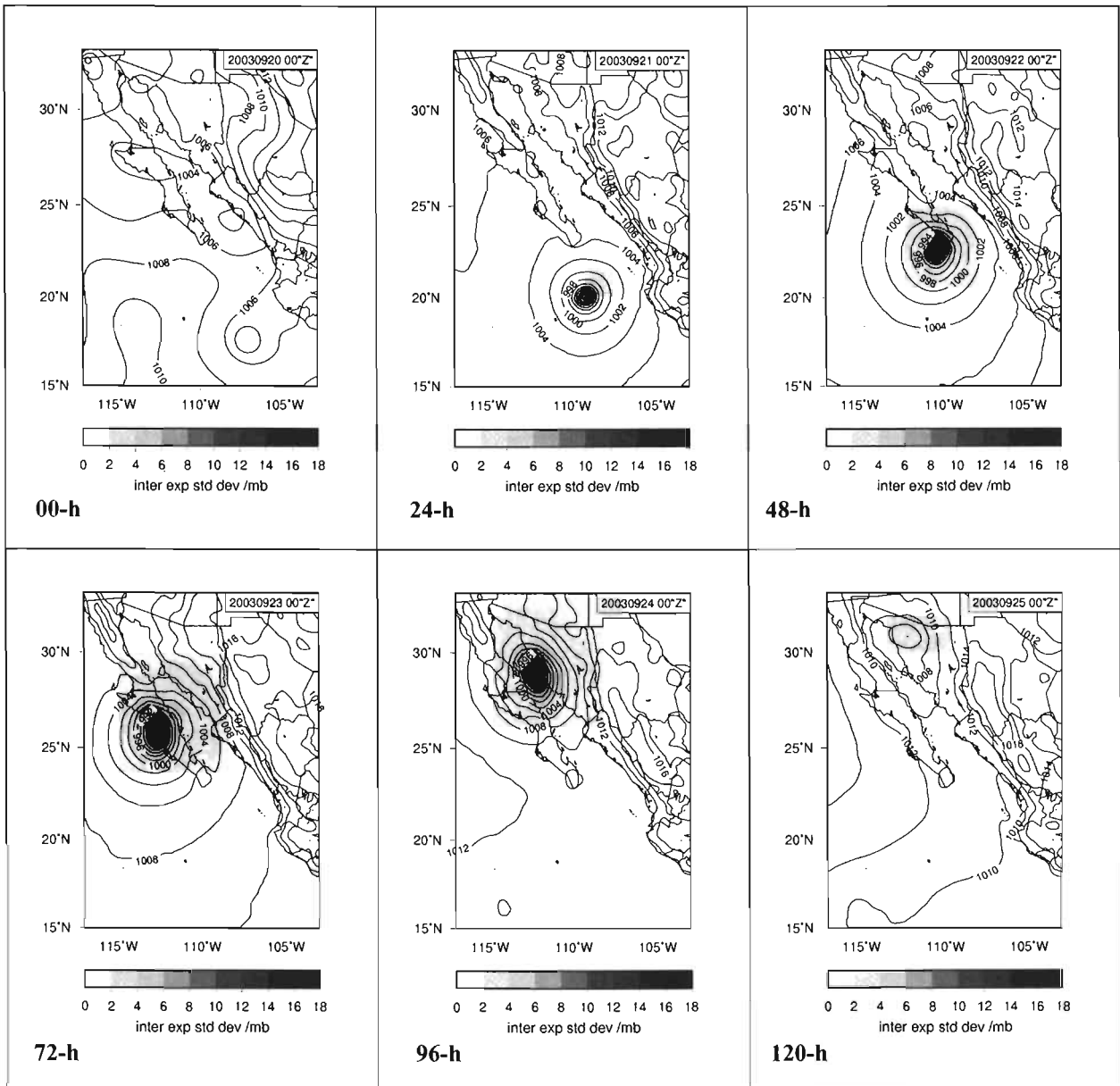


Figura 24. Gráficos de dispersión de los pronósticos de presión en superficie. [Huracán "Marty" (con vórtice artificial)].

Los pronósticos de valores mínimos de presión de “Marty” fueron mejores que en el primer caso, pues la cobertura del ensamble envuelve a la solución desde el principio hasta el final del pronóstico (Fig. 25). El efecto que tuvo el vórtice artificial en los pronósticos de presión, fue que siete de los diez miembros individuales desarrollaron huracanes más intensos que el ocurrido en la realidad. Por otro lado, tres miembros del ensamble no intensificaron al ciclón tropical en algún momento de las 120 horas de pronóstico. Una posible explicación es la parametrización de cúmulus “Anthes-Kuo”, utilizada en los tres experimentos y que no fue considerada en la primera etapa, quedando como un punto a analizar en el futuro. Paradójicamente estos tres resultados hacen que las diferencias entre la media del ensamble y, las observaciones se reduzcan.

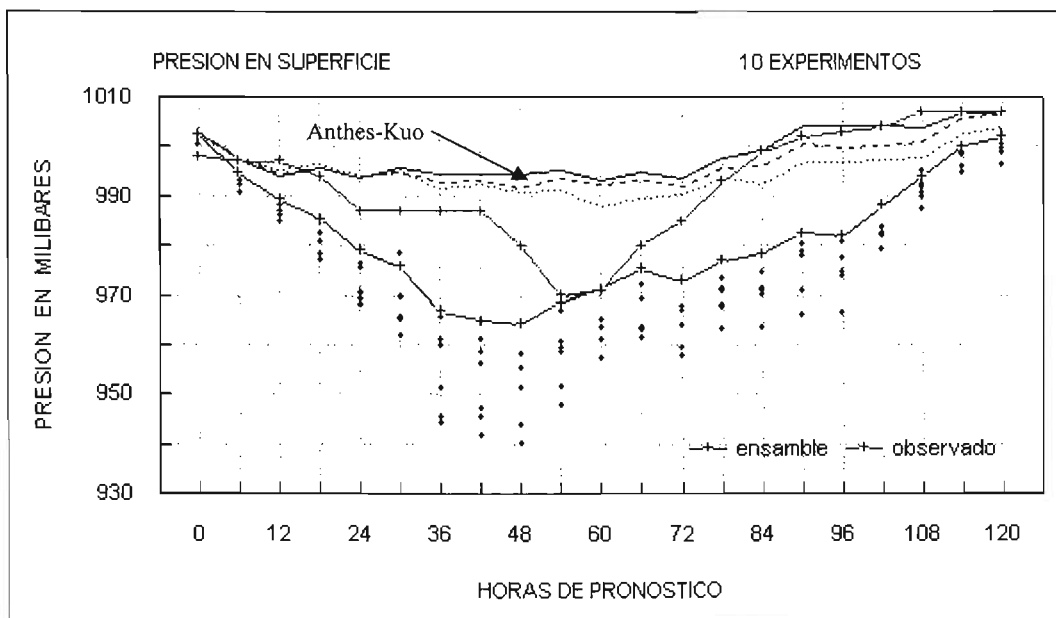


Figura 25. Valores mínimos de presión en superficie pronosticados por el ensamble y observaciones del NHC. [Huracán “Marty” (con vórtice artificial)].

En la figura 26, se muestran los pronósticos de trayectoria del ensamble. Se puede observar que no hay gran dispersión entre los miembros del ensamble desde la condición inicial hasta las 84 horas de pronóstico. El agrupamiento de las soluciones del ensamble da mayor certidumbre en el pronóstico. Al haber acordado los miembros del ensamble en llevar a “Marty” hasta la región noroeste del país, el error promedio de la media del ensamble disminuyó significativamente respecto al primer caso, con un valor de 187 kilómetros para las 120 horas de pronóstico.

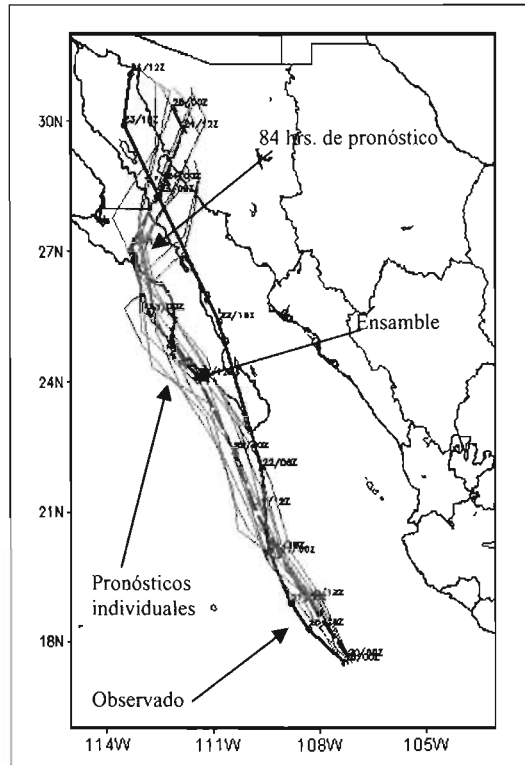


Figura 26. Trayectorias pronosticadas por el ensamble y trayectoria observada por el NHC. [Huracán “Marty” (con vórtice artificial)].

El desempeño del ensamble para pronosticar los vientos máximos alcanzados por “Marty”, fue sobresalientemente mejor que en el primer caso, pues al haber reducido el error de análisis con la implementación de un vórtice artificial en la condición inicial, los pronósticos del ensamble fueron más intensos, y siete de las soluciones pronostican en el punto de mayor intensidad vientos superiores a 33 m/s –umbral de huracán- (Fig. 27), recordando que en el primer caso, ninguno de los miembros individuales intensificó al ciclón a la categoría de huracán. Por otro lado, la cobertura del ensamble envuelve a la solución desde la condición inicial hasta el punto de máxima intensidad del ciclón tropical, donde se observa que al modelo le toma más tiempo pronosticar su debilitamiento.

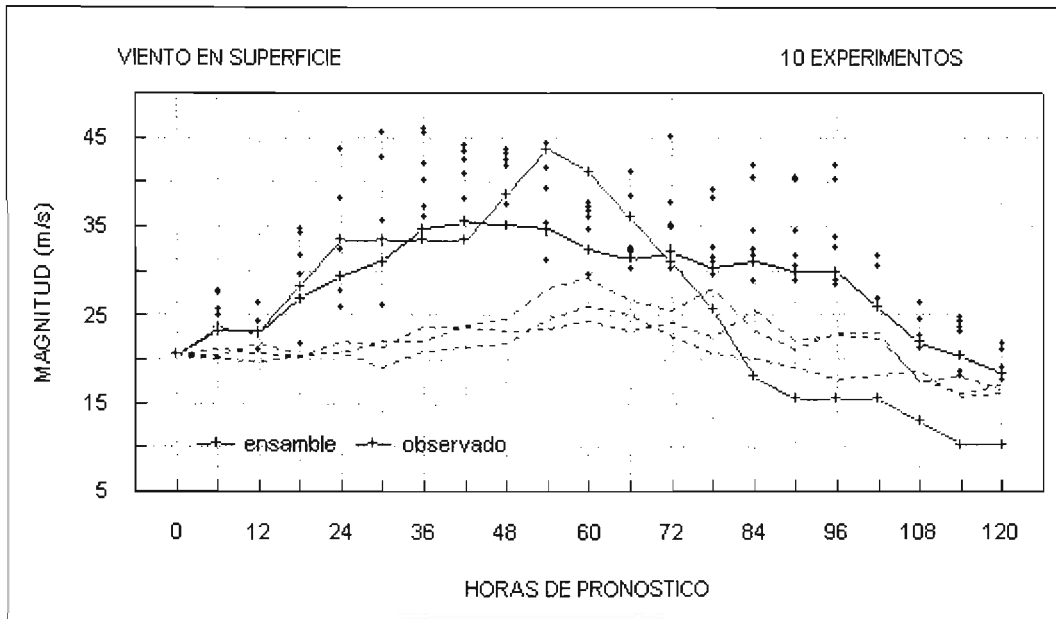


Figura 27. Valores máximos de magnitud del viento en superficie pronosticados por el ensamble y observaciones del NHC. [Huracán “Marty” (con vórtice artificial)].

En la figura 28, se muestran los pronósticos probabilísticos de vientos superiores a 33 m/s. A las 24 horas de pronóstico existe un 50% de probabilidad, momento en el que el NHC intensifica a “Marty” a la categoría de huracán. A las 48 horas de pronóstico, la probabilidad se incrementa a un 70%, momento en el que alcanza la mayor intensidad pronosticada, y de acuerdo con las observaciones, esto ocurrió solamente seis horas después. A partir de las 72 horas de pronóstico, la probabilidad de vientos superiores a 33 m/s disminuye gradualmente y a las 120 horas de pronóstico, la probabilidad es igual a cero, cuando “Marty” se encontraba como una baja remanente al norte del Golfo de California.

La máxima probabilidad alcanzada por el ensamble fue del 70%, ya que tres de los miembros individuales no intensificaron al ciclón tropical. La causa de esto todavía no es bien entendida, sin embargo, se infiere que la parametrización de cúmulus “Anthes-Kuo” utilizada en los tres experimentos puede ser la causa. En términos probabilísticos el ensamble fue preciso en pronosticar la intensificación de “Marty” a la categoría de huracán, así como su debilitamiento sobre la región noroeste del país, y esto para los tomadores de decisiones es de vital importancia.

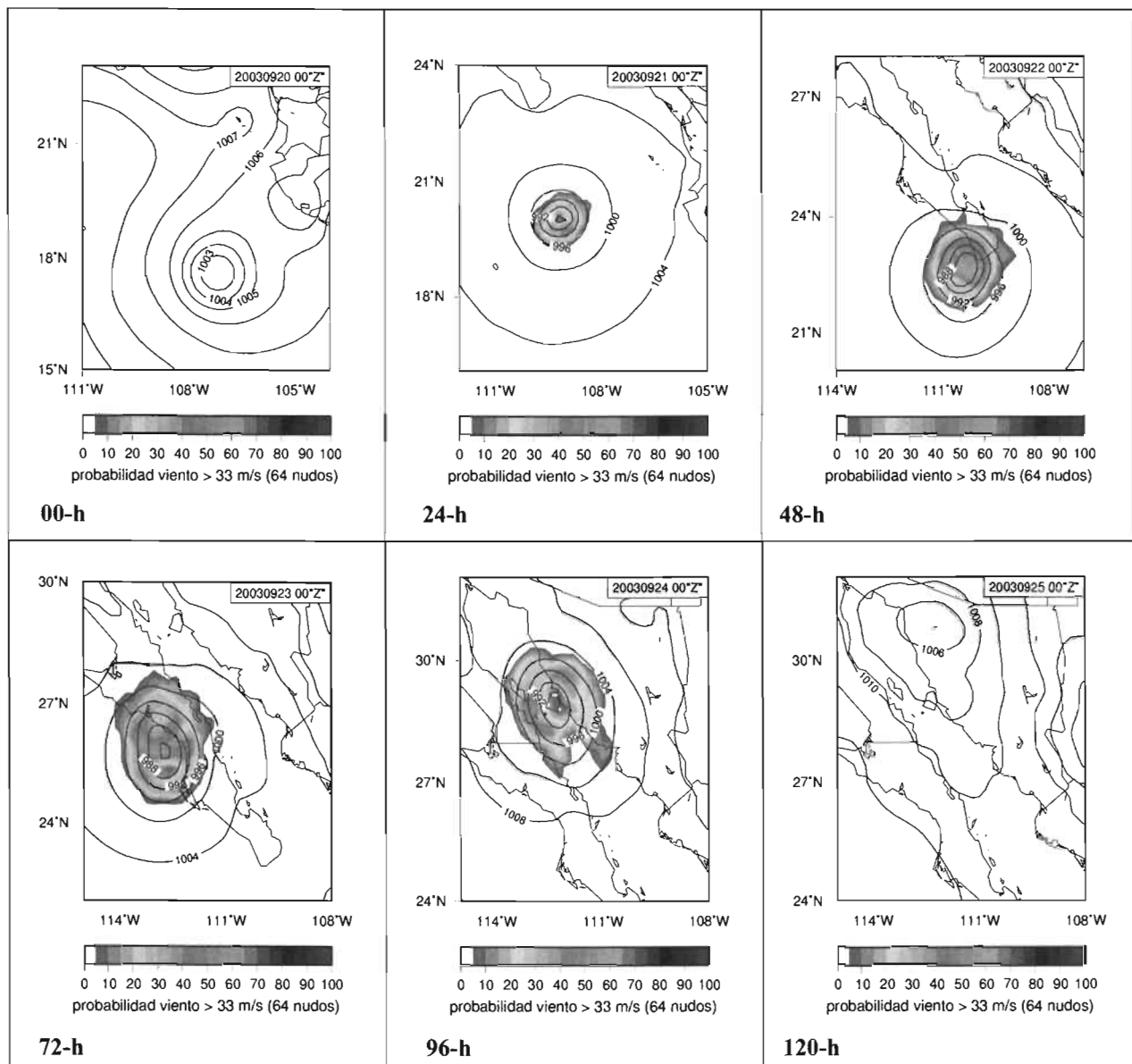


Figura 28. Pronósticos probabilísticos de vientos superiores a 33 m/s y presión en superficie. [Huracán "Marty" (con vórtice artificial)].

Se verificaron los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas del ensamble, contra las observaciones de las estaciones meteorológicas seleccionadas en el primer caso. En la figura 29, se observa –como en el primer caso también– que el ensamble tiende a sobreestimar los pronósticos de precipitación, y resulta de particular interés que La Paz, B.C.S., es para este caso, como para el primero, el lugar que obtuvo los pronósticos de precipitación más altos por el ensamble, siendo congruente con el reporte de daños emitido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes -presentado en el capítulo I-, donde se

informa que La Paz, B.C.S., fue uno de los lugares con mayor afectación por el paso del ciclón tropical. También resulta de interés por su coincidencia con el primer caso, que los pronósticos más precisos se presentaron para la estación meteorológica de Isla Socorro, Col., ya que la diferencia entre el campo pronosticado y el observado es considerablemente menor que las tres estaciones adicionales. Queda abierta la pregunta sobre las posibles causas de un mejor pronóstico de precipitación sobre una región oceánica, en comparación con tres estaciones localizadas sobre el continente.

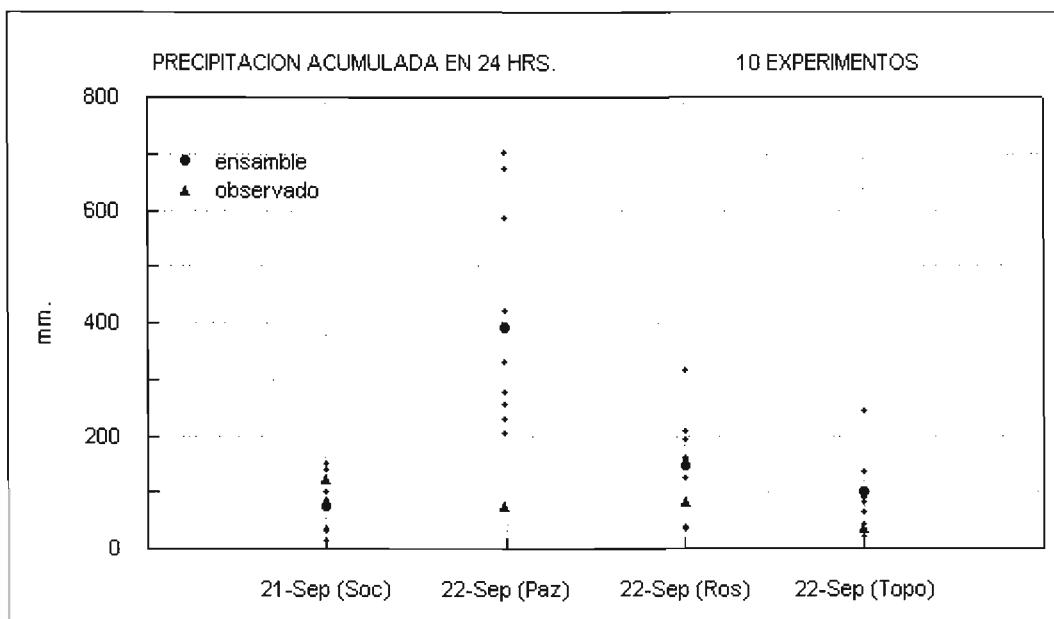


Figura 29. Pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas por el ensamble y observaciones de estaciones de superficie de Isla Socorro (Soc); La Paz, B.C.S. (Paz); Santa Rosalía, B.C. (Ros) y Topolobampo, Sin. (Topo).

En la figura 30, se muestran pronósticos probabilísticos de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas, donde para el día 22 de septiembre, existe una probabilidad del 100% para las estaciones de La Paz, Santa Rosalía y Topolobampo. Por otro lado, se observa el impacto de una resolución espacial más alta en el dominio, pues son mejor representadas las bandas espirales de precipitación, así como el ojo que caracteriza a los ciclones tropicales.

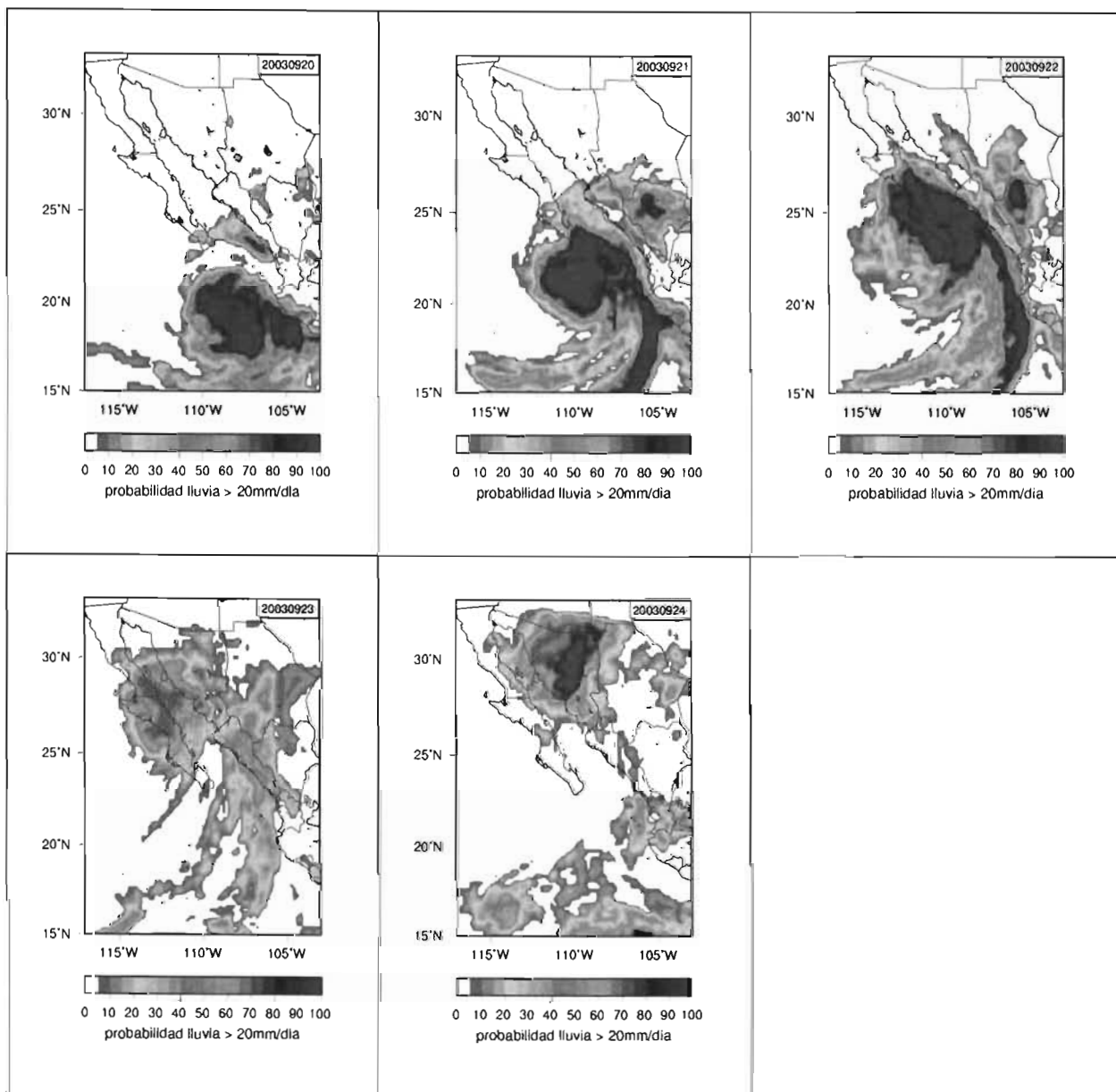


Figura 30. Pronósticos probabilísticos de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas. [Huracán "Marty" (con vórtice artificial)].

3.2.2 Importancia del pronóstico por ensamble.

La importancia del pronóstico por ensamble es que al combinar información de los miembros individuales, se tiene una mayor probabilidad de incrementar la precisión en el pronóstico, pues como se ha visto en este caso, a pesar de la presencia de aparentemente malos resultados, fueron de utilidad para la obtención de un mejor pronóstico –como se puede ver en el pronóstico de la media del ensamble para los valores mínimos de presión de "Marty"–.

3.3 Huracán “Iván”

3.3.1 Descripción sinóptica.

“Iván” se desarrolló a partir de una onda tropical proveniente de la costa occidental de África el 31 de agosto del 2004. Durante las primeras horas del 1 de septiembre, las bandas convectivas comenzaron a desarrollarse alrededor del centro de baja presión, y se estima que se formó una depresión tropical alrededor del 2 de septiembre a las 13:00 “R” (18:00 “Z”). A pesar de la relativa baja latitud (9.7° N) continuó su desarrollo, y se estima que la depresión se convirtió en la tormenta tropical “Iván”, el 3 de septiembre a las 01:00 “R” (06:00 “Z”). “Iván” continuó desplazándose hacia el oeste al sur de 10° N con una intensificación constante, convirtiéndose en huracán a las 01:00 “R” (06:00 “Z”) del 5 de septiembre, cuando se localizaba en latitud 9.5° N y longitud 043.4° W, caracterizado por un centro de baja presión de 987 milibares y vientos máximos sostenidos de 65 nudos (120 km/h). Después de haber alcanzado la intensidad de huracán, la razón de intensificación se incrementó dramáticamente, experimentando un periodo de 18 horas de rápida intensificación (razón > 30 nudos/24h). Estimaciones de satélite indican que “Iván” alcanzó su primer pico de 115 nudos (213 km/h), el 5 de septiembre a las 19:00 “R” (00:00 “Z” del 6 de septiembre). Esto hizo de “Iván” el huracán mayor situado más hacia el sur en la historia. Sin embargo, casi tan rápidamente como se fortaleció también se debilitó en las siguientes 24 horas.

Inmediatamente después del periodo de debilitamiento, “Iván” comenzó una segunda etapa de fortalecimiento con duración de 12 horas, estando bajo la vigilancia de un avión de reconocimiento de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, y los reportes de la tripulación indicaron que “Iván” había alcanzado la categoría 3 en la escala Saffir-Simpson, cuando pasaba a 6 m.n. (11 km) al sur-suroeste de Granada. El diámetro del ojo en ese momento era de aproximadamente 10 m.n. (18.5 km), donde los fuertes vientos afectaron severamente la porción sur de la Isla. Después de pasar por Granada y dentro de la región sureste del Mar Caribe, la intensidad del huracán disminuyó ligeramente hasta el 8 de septiembre a las 13:00 “R” (18:00 UTC), cuando otro periodo de rápida intensificación sobrevino. Datos del avión de reconocimiento indicaron que “Iván” alcanzó su segundo pico de intensidad, con vientos máximos de 140 nudos (259 km/h), situándose en la categoría 5 de la escala Saffir-Simpson y

que fue la primera de tres ocasiones en que alcanzó esta categoría. El desplazamiento previo hacia el oeste-noroeste a 15 nudos (27.7 km/h), gradualmente disminuyó mientras “Iván” cruzaba la región central del Mar Caribe con dirección hacia Jamaica y, cuando pasó por esa Isla, se degradó a huracán categoría 4. Cuando “Iván” se alejaba de Jamaica, volvió a adquirir fuerza, alcanzando la categoría 5 por segunda vez, que sólo mantuvo por un periodo de seis horas antes de regresar nuevamente a categoría 4 el 12 de septiembre. La tendencia de debilitamiento fue de breve duración, reintensificándose por tercera y última ocasión a categoría 5, cuando se encontraba a 80 m.n. (148 km) al oeste de la Isla Gran Caimán.

El 13 de septiembre, cuando “Iván” se desplazaba sobre la región noroeste del Mar Caribe, cambió su trayectoria hacia el noroeste con una velocidad de desplazamiento de entre 8 y 10 nudos (14 y 18.5 km/h). Cuando “Iván” pasó por el Canal de Yucatán, extensas áreas de tierra fueron afectadas sobre la porción occidental de la Isla de Cuba, pero sus efectos fueron lejanamente menores a los ocurridos en Granada, Jamaica y Gran Caimán. Poco después de emerger al Golfo de México en las primeras horas del 14 de septiembre (Fig. 31), “Iván” cambió de dirección hacia el nor-noroeste y luego hacia el norte, impactando en tierra como huracán categoría 3, aproximadamente a las 01:50 “R” (06:50 “Z”) del 16 de septiembre sobre Alabama, Estados Unidos.

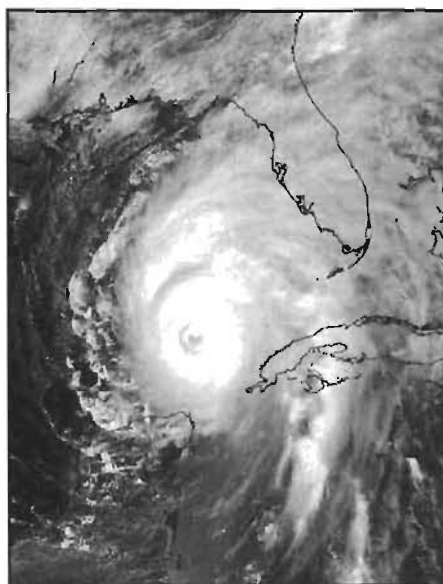


Figura 31. Imagen compuesta (IR2-IR4) de satélite del huracán “Iván” (14 de sept. 2004 06:00 “Z”). (Fuente: NHC)

“Iván” fue directamente responsable de la pérdida de 92 vidas humanas distribuidas de la siguiente forma: 39 en Granada, 25 en los Estados Unidos, 17 en Jamaica, 4 en República Dominicana, 3 en Venezuela, 2 en Gran Caimán, 1 en Tobago y 1 en Barbados. Los registros de precipitación acumulada en 24 horas ocasionados por “Iván” se muestran en la tabla 7.

Fecha	Lugar	Precipitación acumulada en 24 horas (mm)
13 de septiembre 2004	Pinar del Río, Cuba.	195
14 de septiembre 2004	Isla Mujeres, Q.R.	5
14 de septiembre 2004	Isla Pérez, Yuc.	19

Tabla 7. Registros de precipitación acumulada en 24 horas por efecto del huracán “Iván” (de 00 “Z” a 00 “Z”).
(Fuente: Secretaría de Marina y NHC.)

3.3.2 Descripción de la simulación

Se conformó un ensamble de 10 miembros con un dominio de 20 kilómetros de resolución horizontal, 27 coordenadas verticales sigma y un paso de tiempo de 60 segundos para cinco días de pronóstico -11 al 16 de septiembre del 2003-. En todos los casos, excepto en el experimento de control, se asimilaron datos de radiosondeo, estaciones de superficie, barcos y boyas. La perturbación del ensamble se incorporó al variar las opciones físicas del modelo para cada uno de los miembros individuales. Se insertó un vórtice artificial en la condición inicial cercano a la intensidad observada del huracán. La metodología de verificación es la misma que la utilizada para “Marty”.

En la figura 32, se muestran los errores de dispersión del ensamble para la variable presión atmosférica en superficie. Los errores de dispersión parten de un valor mínimo en la condición inicial y gradualmente se incrementan en el tiempo, presentándose un valor máximo a las 72 horas de pronóstico. Su explicación está en que a las 72 horas de pronóstico la distancia entre el ciclón pronosticado por el ensamble y el ciclón observado, tienen la mayor separación -aproximadamente 400 km.-, pues el modelo desplaza con mayor rapidez al ciclón de lo que ocurrió en realidad. Al final del pronóstico los errores de dispersión disminuyen al

acordar los miembros del ensamble en dejar al ciclón tropical sobre la porción norte del Golfo de México. Por otro lado, la media del ensamble tuvo los errores de dispersión más pequeños que cualquier miembro individual, y esto habla de las ventajas de utilizar una metodología de pronóstico por ensamble.

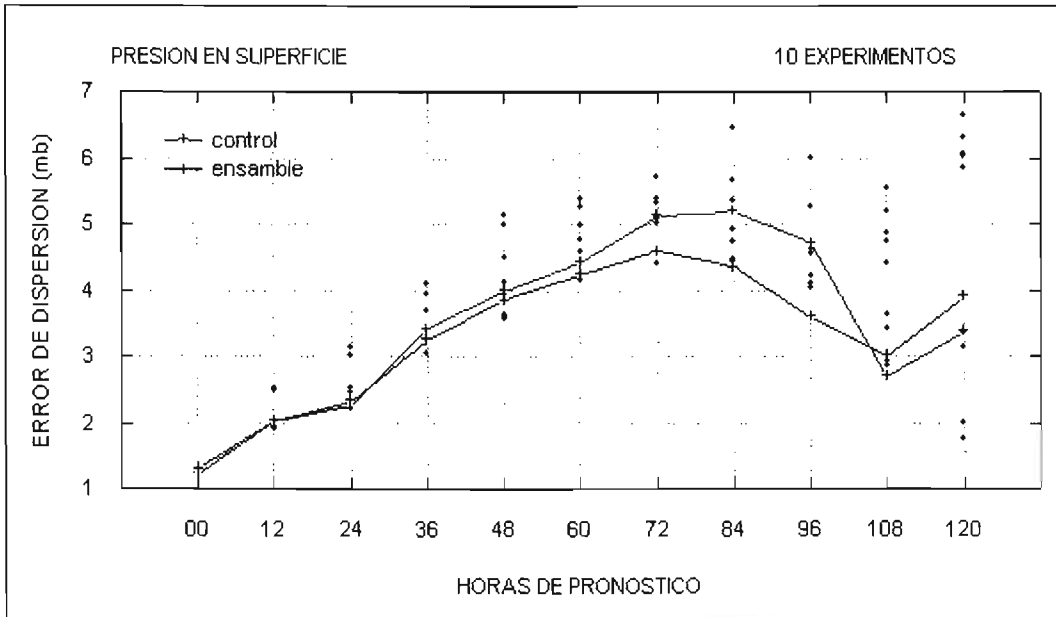


Figura 32. Errores de dispersión de los pronósticos del ensamble para la variable presión atmosférica en superficie. (Huracán “Iván”).

“Iván” fue un huracán más complejo de pronosticar que “Marty”, pues durante el periodo de evaluación, tuvo dos marcados periodos de intensificación y un recurvamiento hacia el Golfo de México sobre el Canal de Yucatán. Esta complejidad en el pronóstico se refleja en la dispersión de los pronósticos de presión en superficie (Fig. 33), donde a partir de las 24 horas de pronóstico, la dispersión de las soluciones se incrementa gradualmente en el tiempo, lo que representa un estado de creciente incertidumbre ó de menor confiabilidad en el pronóstico, y que es proporcional también al crecimiento en el tiempo de los errores de dispersión.

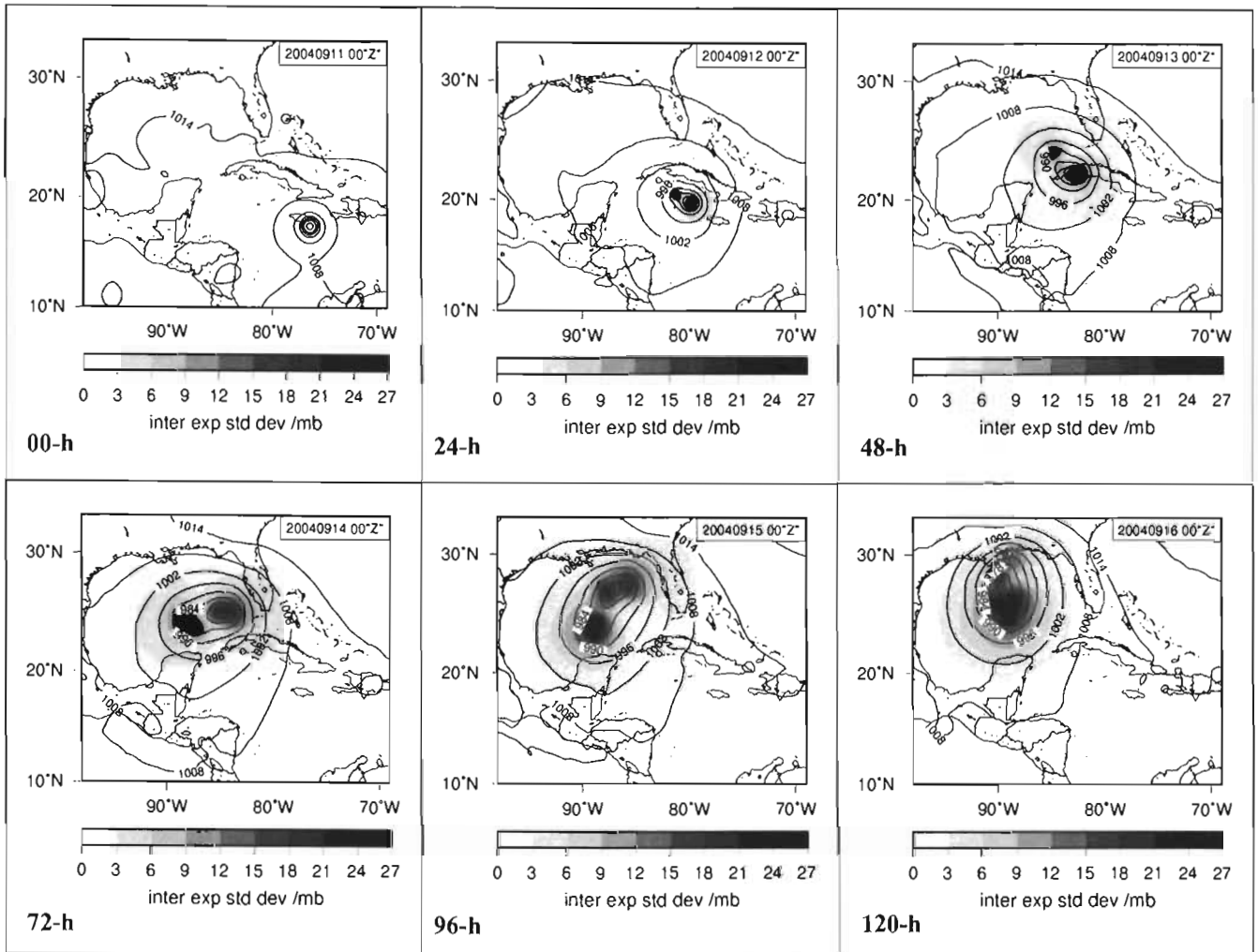


Figura 33. Gráficos de dispersión en milibares de los pronósticos de presión en superficie (Huracán "Iván").

El desempeño del ensamble para pronosticar los valores mínimos de presión de "Iván" es una situación a discutir. La condición inicial -11 de septiembre del 2004 00 "Z"- surge en el momento en que el ciclón tropical tiene una intensidad de huracán categoría 5, con un valor mínimo de presión de 926 milibares y vientos máximos sostenidos de 135 nudos (250 km/h), de acuerdo con las observaciones del NHC. Por otro lado, el esquema de vórtices artificiales del MM5 está diseñado para "mejorar" los vórtices contenidos en los análisis globales (Davis, 2001) -que generalmente son muy extensos y débiles-, de donde se deriva la condición inicial para el modelo. Este esquema se compone de dos partes: 1) Detección y extracción del ciclón tropical del análisis global, y 2) Cómputo del vórtice artificial y su integración al campo modificado de trasfondo.

Lo anterior puede dar una explicación a la diferencia de 49 milibares en la condición inicial entre el valor de mínima presión del vórtice artificial y el valor observado (Fig. 34), pues como se ha dicho, el esquema está diseñado para mejorar los vórtices contenidos en los análisis globales, y cuando el esquema hace el cómputo del nuevo vórtice artificial, lo hace de tal forma de que quede integrado al campo de trasfondo sin que esto ocasione marcadas diferencias respecto al medio ambiente a su alrededor. Se puede decir que el esquema de vórtices artificiales del MM5 no es funcional cuando la diferencia en intensidad entre el ciclón observado y, el vórtice de los análisis globales es grande, pues el mismo campo de trasfondo de los análisis suaviza la intensidad computada por el esquema de vórtices artificiales. En el caso de “Marty”, el esquema de vórtices artificiales hizo un buen ajuste de la intensidad, pero no se presentaban grandes diferencias entre el ciclón observado y el vórtice de los análisis globales, pero en este caso, la condición inicial parte cuando el ciclón observado tiene una intensidad de huracán categoría 5, y la diferencia con respecto al análisis global es mucho mayor. Como se vió en el primer caso, al presentarse un error de análisis en la condición inicial, la cobertura de los pronósticos del ensamble no fue suficiente para envolver a la solución.

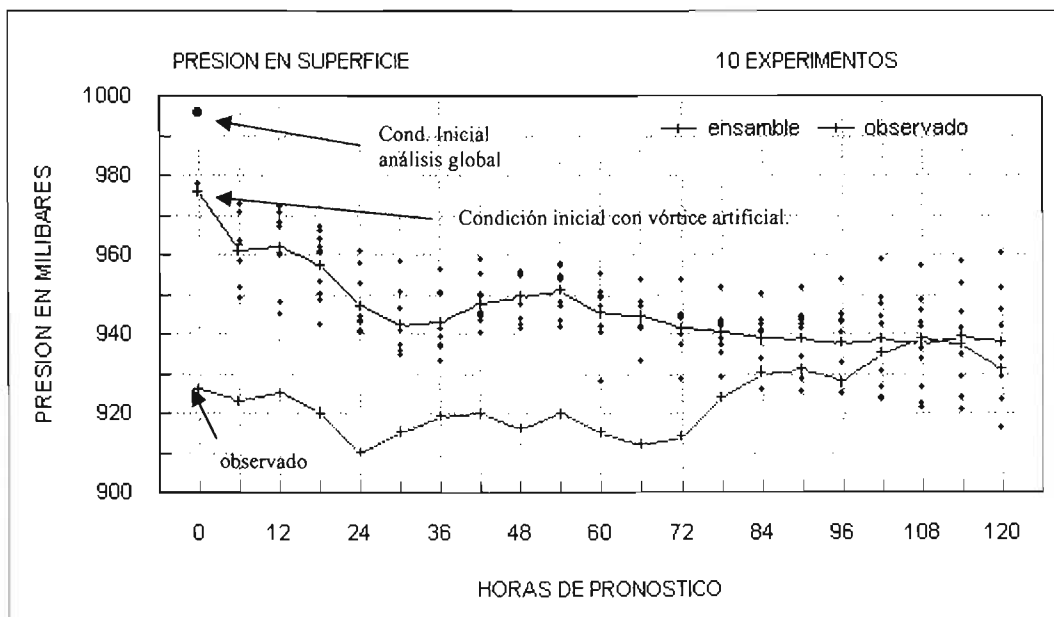


Figura 34. Valores mínimos de presión en superficie pronosticados por el ensamble y observaciones del NHC. (Huracán “Iván”)

Uno de los motivos de haber seleccionado a “Iván”, fue ver si el modelo era capaz de pronosticar el recurvamiento del ciclón tropical sobre el Canal de Yucatán, pero como se puede observar en la figura 35, los pronósticos del ensamble lo llevan en línea recta desde la condición inicial cerca de la isla de Jamaica, hasta el norte del Golfo de México, cruzando por el extremo occidental de la isla de Cuba. Una posible causa de esto es que los sistemas sinópticos de mesoescala que pudieron haber dirigido la trayectoria del ciclón tropical –como pueden ser: sistemas de alta y de baja presión, frentes, depresiones, convergencias, subsidencias, etc.- quedaron fuera de la frontera del modelo y no tuvieron ningún impacto en el pronóstico, como lo pudieron haber tenido con el ciclón tropical observado. El error promedio en las posiciones pronosticadas por la media del ensamble, fue de 238 kilómetros para las 120 horas de pronóstico.

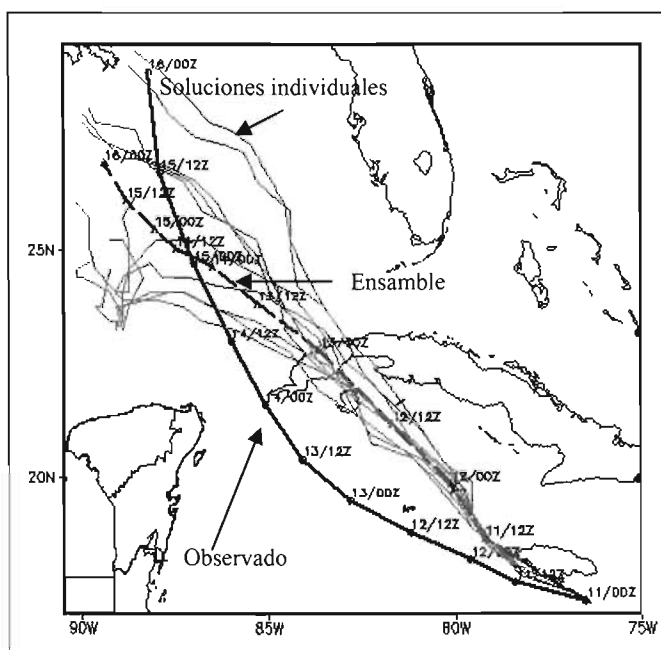


Figura 35. Trayectorias pronosticadas por el ensamble y trayectoria observada por el NHC. (Huracán “Iván”).

El grado de complejidad para pronosticar la trayectoria del huracán “Iván”, también se hace evidente en el pronóstico oficial a 120 horas (5 días) emitido por el Centro Nacional de Huracanes de Miami, Florida (Fig. 36), válido del 9 de septiembre del 2004 a las 12:00 “Z”, al 14 de septiembre del 2004 a las 12:00 “Z”, donde ninguno de los modelos de predicción numérica utilizados (AVN, GFDL, NOGAPS, WP), pronostica el paso del ciclón tropical

sobre el Canal de Yucatán, de hecho, el pronóstico oficial cruza al ciclón tropical por la región central de la Isla de Cuba. Así mismo, se puede observar que la dispersión de los pronósticos se incrementa gradualmente en el tiempo, representando un estado de creciente incertidumbre en el pronóstico.

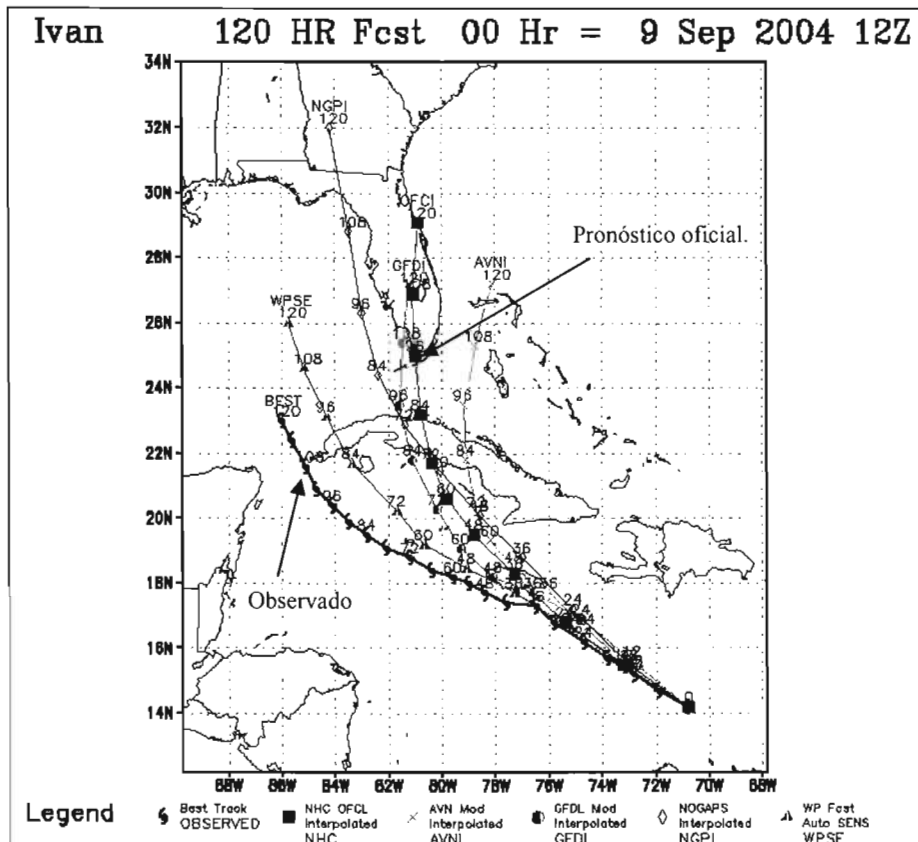


Figura 36. Pronóstico oficial de trayectoria del huracán "Iván" del NHC, así como pronósticos individuales de diferentes modelos de predicción numérica. (Fuente: NHC).

En la figura 37, se muestran los pronósticos de magnitud máxima del viento en superficie, con un resultado similar al obtenido con el pronóstico de valores mínimos de presión, pues el vórtice artificial hace el ajuste a la intensidad observada de la tormenta. La diferencia en intensidad entre los análisis globales y el campo observado para la condición inicial es de 37 m/s, reduciéndose a 13 m/s con la aplicación del vórtice artificial. Al presentarse un error de análisis en la condición inicial, la cobertura de los pronósticos no fue suficiente para envolver a la solución.

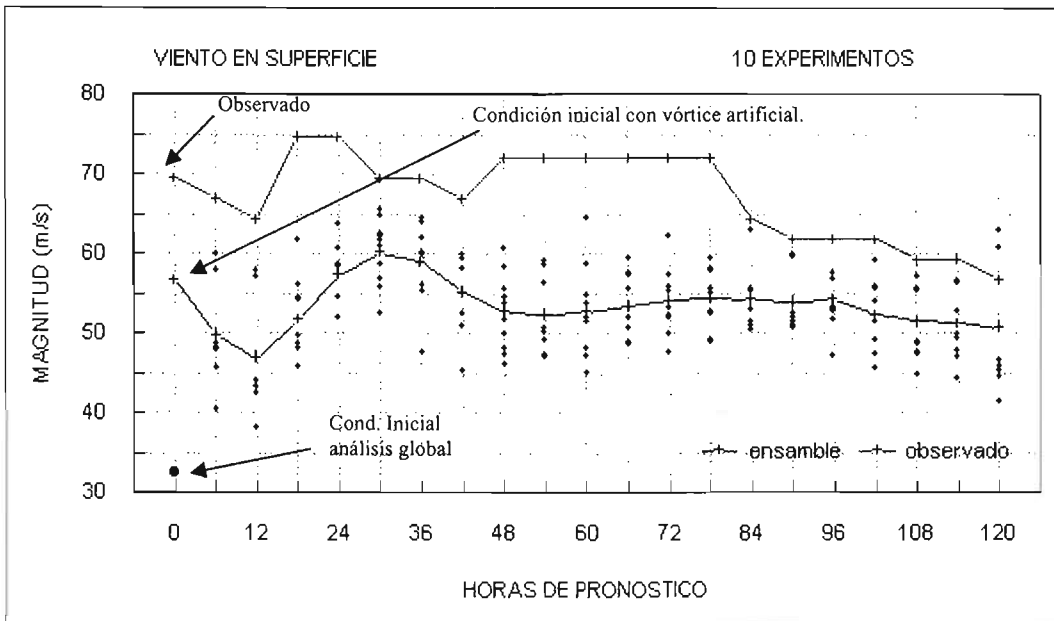


Figura 37. Valores máximos de magnitud del viento en superficie pronosticados por el ensamble y observaciones del NHC. (Huracán "Iván")

En la figura 38, se muestran los pronósticos probabilísticos de vientos superiores a 33 m/s para el huracán "Iván", donde la probabilidad es del 100% para las 120 horas de pronóstico, y que es representativo de que los 10 miembros del ensamble acuerdan en mantener la magnitud de los vientos por arriba de este umbral -como ocurrió en realidad-, pues de acuerdo a la descripción sinóptica impactó en tierra como un huracán categoría 3. Adicionalmente, se puede observar que la dispersión de los pronósticos individuales del ensamble, tiene que ver con el amplio radio de influencia de los vientos con intensidad de huracán, ya que en las últimas horas de pronóstico, casi la totalidad del Golfo de México queda bajo la influencia del campo de viento del huracán pronosticado. En términos probabilísticos el ensamble es preciso en mantener la magnitud de los vientos por arriba de este umbral.

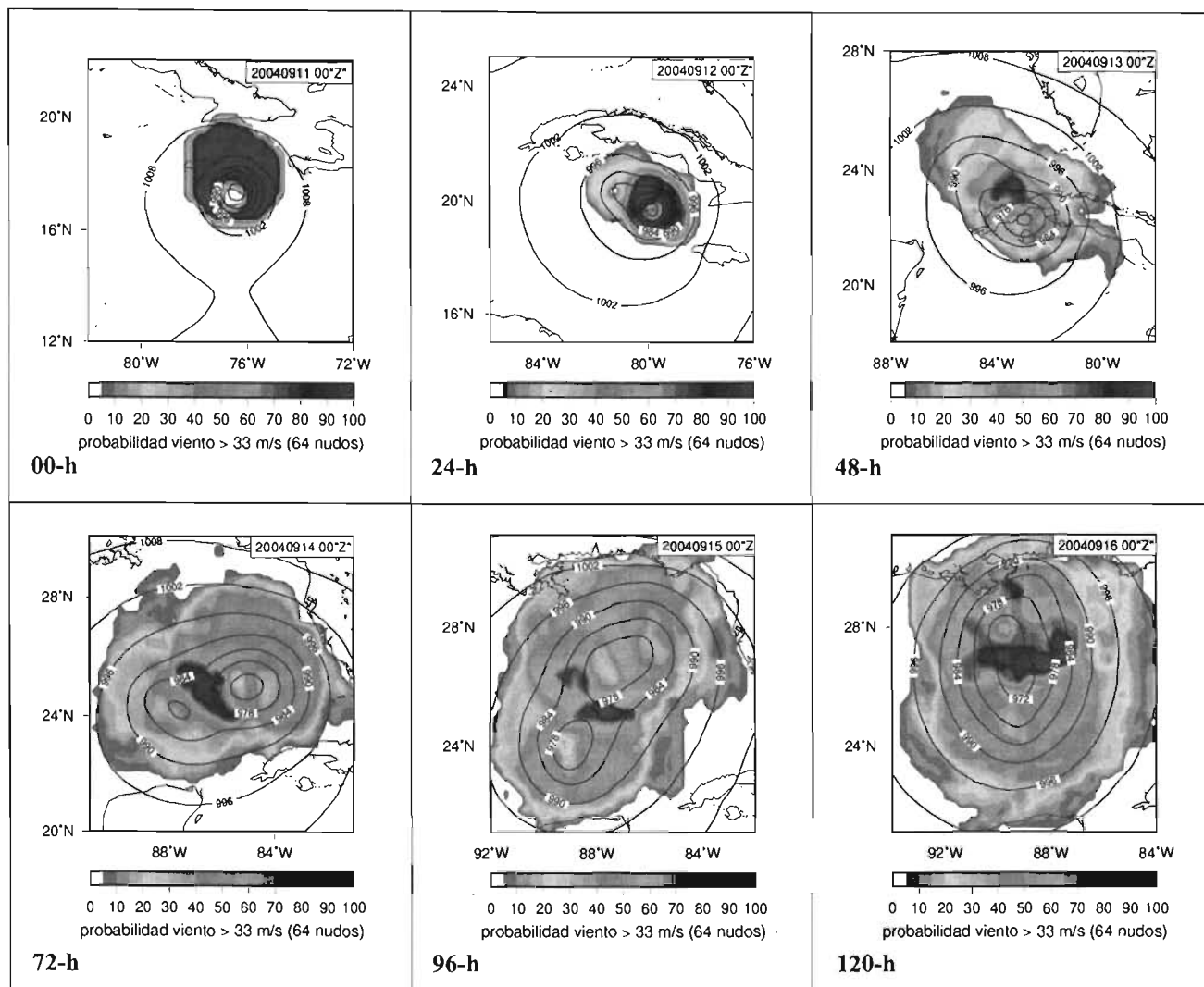


Figura 38. Pronósticos probabilísticos de vientos superiores a 33 m/s y presión en superficie (Huracán "Iván").

Los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas de la media del ensamble, se verificaron contra las observaciones de las Estaciones Meteorológicas Automáticas de Superficie de la Secretaría de Marina, emplazadas en Isla Mujeres, Q. Roo e Isla Pérez, Yuc., para el día 14 de septiembre del 2004. Así mismo, se obtuvo el registro de precipitación de la estación meteorológica de Pinar del Río, Cuba, del reporte de "Iván" emitido por el NHC, para el día 13 de septiembre del 2004. En la figura 39, se observa al igual que en los casos anteriores, que los pronósticos de la media del ensamble sobreestiman la precipitación para las estaciones de Isla Pérez e Isla Mujeres, donde en esta última, sólo se registraron 5 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas el 14 de septiembre. No obstante, para el caso de Pinar del Río donde se registraron 195 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas el 13 de

septiembre, los pronósticos del ensamble subestimaron la precipitación. Los pronósticos de precipitación dependen mucho de la precisión de los pronósticos de trayectoria, y si las diferencias entre la posición observada y pronosticada son grandes, los errores en el pronóstico de precipitación pueden ser grandes también.

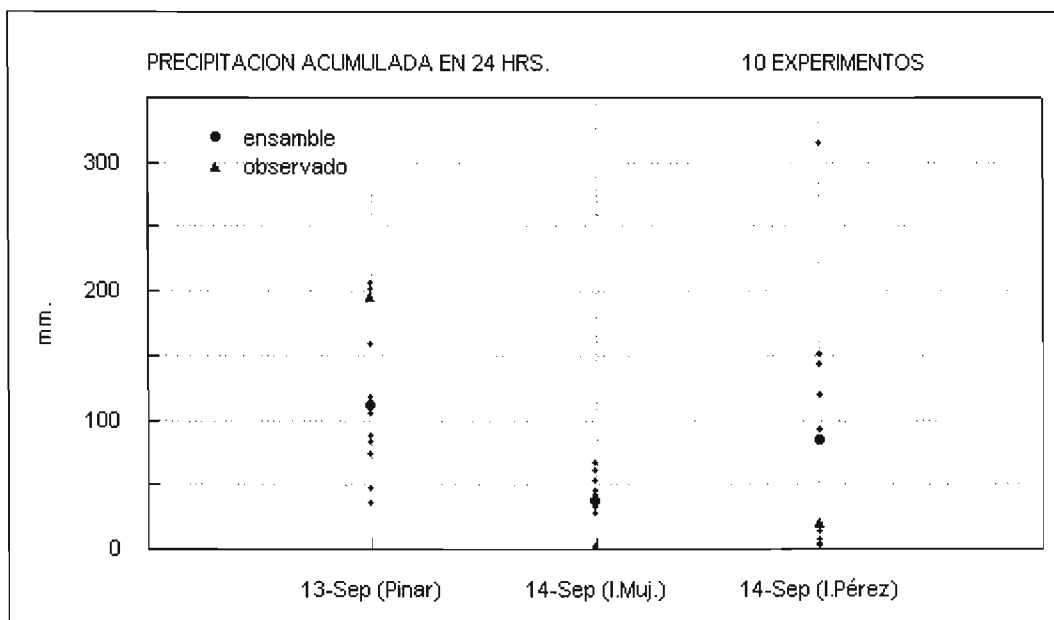


Figura 39. Pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas por el ensamble y observaciones de estaciones de superficie de Isla Mujeres, Q.R. (I. Muj.); Isla Pérez, Yuc. (I. Pérez) y Pinar del Río, Cuba (Pinar). (Huracán “Iván”)

En la figura 40, se muestran pronósticos probabilísticos de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas, donde se puede apreciar la extensión del campo de lluvias –que puede estar asociado también a la dispersión de los pronósticos individuales-, y que la más alta probabilidad se encuentra cerca del centro del ciclón. Con los resultados obtenidos en los tres casos de estudio, se considera que se debe hacer una evaluación más a fondo de los pronósticos de precipitación del MM5, con el fin de verificar si el modelo tiende en general a sobreestimar la cantidad de precipitación sobre las regiones tropicales, como es el caso del modelo del Centro de Predicción del Tiempo y Estudios Climáticos de Brasil (Mendonça, 1999). Si la situación fuera igual con el MM5, se podrían tomar consideraciones similares como en ese modelo. Por ejemplo, al fijar un umbral de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas –umbral de lluvias fuertes-, las regiones con probabilidades por arriba del 65% se pueden considerar con gran posibilidad de ocurrencia de

precipitaciones fuertes o intensas, y si la probabilidad es menor a ese porcentaje, considerarlo como el total acumulado en 24 horas.

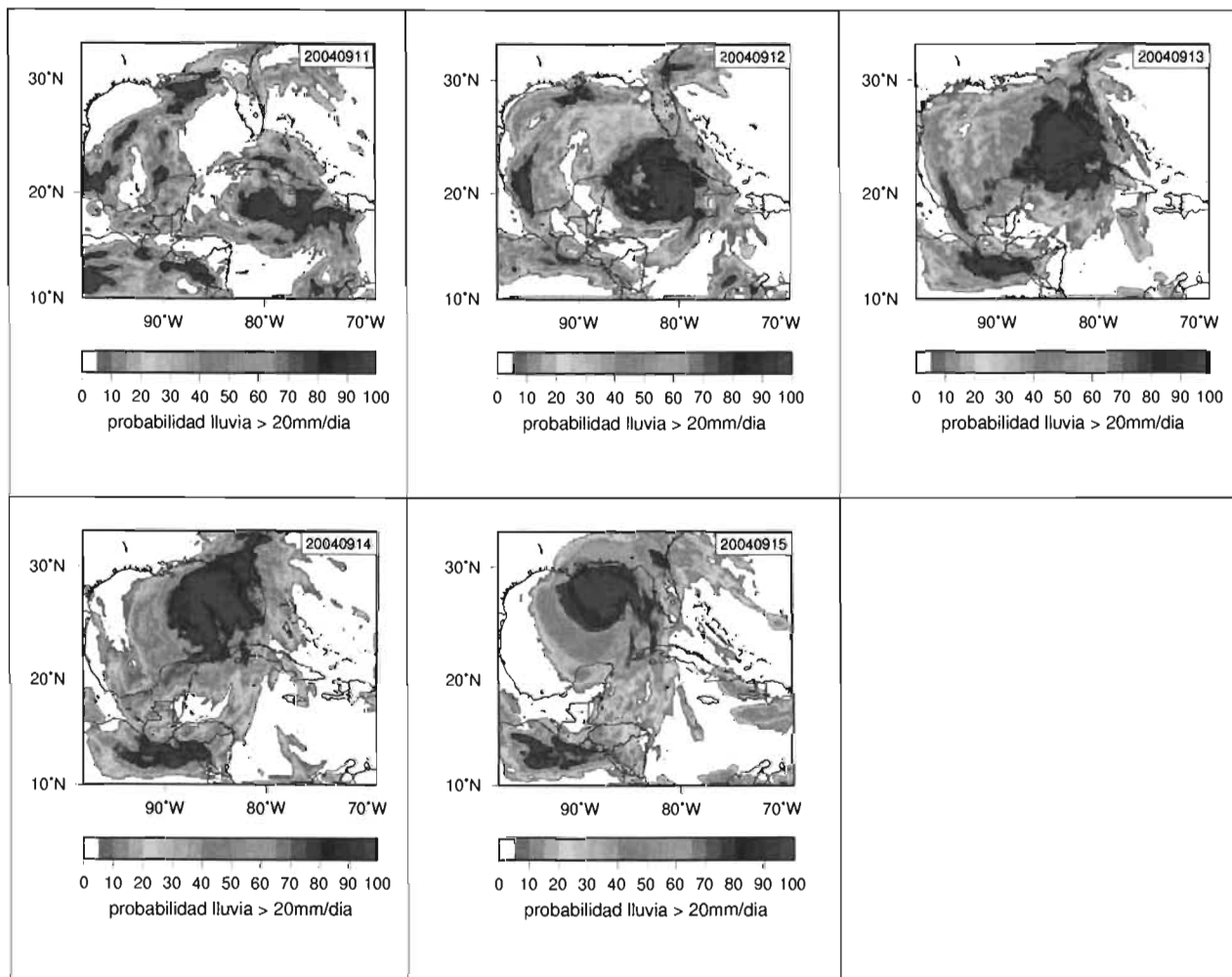


Figura 40. Pronósticos probabilísticos de más de 20 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas. (Huracán “Iván”)

En este tercer y último caso de estudio del presente trabajo, el mayor problema se presentó con el pronóstico de intensidad del ciclón tropical, pues en un primer plano, el esquema de vórtices artificiales del MM5 no llegó a ajustar al vórtice artificial a la intensidad observada del huracán en la condición inicial, pues como se comentó anteriormente, la diferencia entre el campo observado y el campo del análisis global de donde se deriva la condición inicial era muy grande, siendo que el análisis global situaba al ciclón tropical con una intensidad de huracán categoría 1 de la escala Saffir-Simpson, y de acuerdo a las

observaciones, el ciclón tropical tenía una intensidad de huracán categoría 5 para la fecha de la condición inicial (11 de septiembre del 2004 a las 00:00 “Z”).

Por otro lado, la trayectoria del ciclón pronosticada por el ensamble fue en línea recta desde inmediaciones de la isla de Jamaica, hasta la porción norte del Golfo de México, esto se atribuye a que los sistemas sinópticos de mesoescala que pudieron haber dirigido la trayectoria del ciclón tropical, quedaron fuera de las condiciones de frontera lateral del modelo. Por lo que para casos futuros de pronóstico de ciclones tropicales, se tiene que hacer un análisis sobre cuál debe ser la dimensión apropiada del dominio, a fin de que los sistemas sinópticos de mesoescala queden incorporados en la condición inicial del modelo.

3.3.3 Importancia de los pronósticos probabilísticos.

A final de cuentas los usuarios de la información meteorológica no desean saber el valor preciso de una variable (i.e., temperatura, precipitación, viento, etc.), sino lo que quieren es basar sus decisiones en función de esa variable. Para tomar una decisión razonable, el riesgo de tomar una acción debe ser evaluado, y para hacerlo, es preciso contar con información acerca de la incertidumbre asociada a esa variable meteorológica, que un pronóstico probabilístico puede proporcionar, a diferencia de un pronóstico determinístico que no considera la incertidumbre.

Capítulo IV

Conclusiones

4.1 Importancia del pronóstico probabilístico para casos de huracanes

En el presente trabajo se probó la metodología de **“pronóstico a mediano plazo por ensamble”** -pronóstico probabilístico en vez de determinístico- para casos de huracanes en la Zona Económica Exclusiva de México. Se utilizó el modelo de mesoescala MM5, de dominio público, que es uno de los modelos de mesoescala más completos. Tanto para la condición inicial como para las condiciones de frontera lateral del modelo, se utilizaron datos de los análisis globales del NCEP, ya que no se pudo disponer de datos de pronóstico –históricos- sin costo, para las condiciones de frontera lateral; pues en forma operacional, los datos de pronóstico solamente se encuentran disponibles para las últimas 72 horas diariamente.

Las perturbaciones en la condición inicial del ensamble se introdujeron al variar los esquemas de asimilación de datos y opciones en la física del modelo. Con el fin de mejorar la predicción en la intensidad, se insertó un vórtice artificial cercano a la intensidad observada de la tormenta en la condición inicial. Para la evaluación objetiva de los pronósticos de presión en superficie, se emplearon los análisis globales del NCEP interpolados a la malla regular del dominio de trabajo, con el fin de determinar, en periodos de 12 horas, los errores de dispersión de los pronósticos, y que es considerada como la medida más importante para verificar la habilidad en el pronóstico (Kalnay, 2000).

Los pronósticos de la media del ensamble fueron comparados con el experimento de control, para ver el impacto que tiene la asimilación de datos en el pronóstico a mediano plazo. A partir de las observaciones del Centro Nacional de Huracanes en Miami, Florida, EE.UU., se obtuvieron los errores en el pronóstico de posición de los ciclones tropicales, así como de los valores mínimos de presión y máximos de intensidad del viento. Los pronósticos de

precipitación se compararon con observaciones de las estaciones meteorológicas automáticas de superficie de la Secretaría de Marina.

- Para el primer caso, el error de análisis fijó un límite de predictibilidad en los pronósticos de intensidad y trayectoria del ciclón tropical “Marty”; principalmente a partir de las 72 horas de pronóstico, donde la gran dispersión de las soluciones llevó a un estado de incertidumbre tal, que poco margen dejó para la obtención de buenos resultados. Sin embargo, la media del ensamble tuvo, en general, un mejor desempeño que los pronósticos individuales al tomar la información de sus integrantes, pero su precisión quedó comprometida por los mismos errores de sus integrantes. El experimento de control quedó entre los miembros del ensamble con menores errores de dispersión, y se atribuye a una mala técnica de asimilación de datos en la condición inicial de los demás miembros. Los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas, tienden en general, a ser sobreestimados.
- Para el segundo caso, al haber reducido el error de análisis con la implementación de un vórtice artificial cercano a la intensidad observada de la tormenta, en la condición inicial, los pronósticos de intensidad y trayectoria del ciclón fueron significativamente mejores que en el primer caso, pues el 70% de los integrantes del ensamble lo situaron en la condición de huracán, y los errores en el pronóstico de trayectoria disminuyeron considerablemente. En términos probabilísticos, el ensamble fue preciso en pronosticar la intensificación del ciclón tropical a la condición de huracán, así como su disipación sobre la región noroeste del país, y que puede ser una gran herramienta para la emisión de advertencias ante la amenaza de un ciclón tropical. Los pronósticos de precipitación acumulada en 24 horas tienden en general a ser sobreestimados, sin embargo, al igual que en el primer caso, los pronósticos más precisos se presentaron para la estación de Isla Socorro, localizada en una región oceánica.

- Para el tercer caso, el esquema de vórtices artificiales del MM5 no ajustó al vórtice artificial a la intensidad observada del huracán en la condición inicial, pues la diferencia entre el campo observado y el campo del análisis global de donde se deriva la condición inicial era grande, siendo que el análisis global situaba al ciclón tropical con una intensidad de huracán categoría 1 de la escala Saffir-Simpson, y de acuerdo a las observaciones, el ciclón tropical tenía una intensidad de huracán categoría 5 para la fecha de la condición inicial (11 de septiembre del 2004 a las 00:00 “Z”).

Al presentarse un error de análisis en la condición inicial, los pronósticos de intensidad del ensamble no envolvieron a la solución. Por otro lado, la trayectoria pronosticada por fue en línea recta desde Jamaica hasta la porción norte del Golfo de México, cuando en realidad el ciclón recurvó sobre el canal de Yucatán. Se piensa que los sistemas sinópticos de mesoescala que pudieron haber dirigido al ciclón tropical en línea curva sobre el canal de Yucatán, quedaron fuera de las condiciones de frontera lateral del modelo, por lo que para casos futuros de pronóstico de ciclones tropicales, se tiene que hacer un análisis sobre cuál debe ser la dimensión apropiada del dominio, a fin de que los sistemas sinópticos de mesoescala queden incorporados en la condición inicial del modelo. En términos probabilísticos el ensamble fue preciso en mantener una probabilidad del 100% de vientos superiores a 33 m/s, para los cinco días de pronóstico, como ocurrió en realidad. Los pronósticos de precipitación para dos de las estaciones fueron sobreestimados, con excepción de la estación de Pinar del Río donde, de acuerdo a las observaciones, se registraron 195 milímetros de precipitación acumulada en 24 horas, y el pronóstico del ensamble fue subestimado.

- En el presente trabajo como ya se mencionó, se utilizaron datos de los análisis globales del NCEP para las condiciones de frontera lateral del modelo, y se puede pensar que de utilizar datos de pronóstico, es posible que la magnitud de los errores en el pronóstico se incrementen, pero mucho depende también, de la buena o mala representación que hagan los modelos globales para las regiones tropicales, como fue señalado por Hausman (2001).

- El manejo de la información meteorológica en términos de probabilidad, permite a los usuarios tener información acerca de la incertidumbre asociada al pronóstico numérico del tiempo, de esta forma se puede evaluar el riesgo de tomar una decisión razonable.

4.2 Importancia para el SIAT CT

Dentro de los aspectos técnicos del Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales, se consideran 5 etapas de alerta, la primera es la “Alerta Azul-Aviso”, que se establece cuando se ha detectado la presencia de un ciclón tropical, o cuando éste permanece a más de 72 horas de la posibilidad de que comience a afectar. Con una metodología de pronóstico por ensamble se pueden extender los pronósticos a 96 o 120 horas, y que podría ser de gran utilidad para un planeamiento de acciones con más tiempo de anticipación, fundamentadas en la probabilidad de su impacto en algún lugar del país.

4.3 Trabajo a futuro

- Quedan todavía muchas preguntas científicas por responder y que bien pueden justificar el trabajo a futuro, por ejemplo:
 1. ¿Cuáles son los límites intrínsecos de predictibilidad de ciclones tropicales, en términos de su formación, movimiento e intensidad, y qué factores físicos determinan estos límites?
 2. ¿Cuáles son las deficiencias observacionales y del modelo que limitan la precisión de los pronósticos de ciclones tropicales?
 3. ¿Cuál es la mejor forma de construir un ensamble?
- El esquema de vórtices artificiales del modelo MM5 proporciona una mejora en el pronóstico, pero todavía se carece de información adecuada sobre la influencia de asimetrías y estructura vertical.

- Se requiere conocer con mayor detalle el papel que juegan los procesos convectivos en el desarrollo ó evolución de los ciclones tropicales, para así, mejorar su pronóstico.
- Diseñar un esquema operativo de pronóstico a mediano plazo, por ensamble, para la Secretaría de Marina, y determinar los productos de mayor beneficio en términos de información meteorológica condensada, para los Mandos Territoriales y Unidades de Superficie en la mar.
- Acoplar los pronósticos de viento en superficie, del ensamble, a un modelo de oleaje de escala regional.

APENDICE

DECLARACIÓN DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN LAS ECUACIONES DE PRONÓSTICO DEL MM5.

- ρ_0 = Densidad inicial.
- f = Parámetro de Coriolis.
- g = Gravedad.
- w = Velocidad vertical.
- T = Temperatura.
- T_0 = Temperatura inicial.
- p = Presión.
- p' = Perturbación del campo de presión.
- \dot{Q} = Cantidad de calor por unidad de masa añadido al sistema.
- r_{tierra} = Radio de la tierra.
- σ = Coordenada sigma.
- c_p = Calor específico a presión constante.
- θ_0 = Temperatura potencial inicial.
- D = Término de difusión.
- u = Componente zonal
- v = Componente meridional.
- w = Componente vertical.

- Las ecuaciones 2.2 – 2.4 incluyen los términos (fu y fw), que representan los componentes de la fuerza de Coriolis, donde $f = 2\Omega \sin \lambda$, $a = \lambda - \lambda_c$.
- $u \frac{\partial m}{\partial y}, v \frac{\partial m}{\partial x}$ representan los efectos de curvatura, y m es el factor de mapa [ajuste que se realiza obedeciendo al tipo de proyección a utilizar (Lambert conformal, Polar estereográfico ó Mercator)].

- $p^* = p_{\text{superficie}} - p_{\text{tope}}$, donde p_{tope} y $p_{\text{superficie}}$ son los valores de p_0 en el tope superior del modelo y en superficie.
- También existen ecuaciones de pronóstico para vapor de agua, y variables microfísicas como nubes y precipitación. Estas ecuaciones incluyen términos de advección y términos de fuentes y sumideros.

Ecuaciones de movimiento. Desde el punto de vista teórico, este sistema describe el movimiento de la atmósfera en cualquier escala, desde el flujo del humo de un cigarro, pasando por la formación de nubes cúmulus, hasta flujos de escala planetaria.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{Movimiento zonal.}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \text{Movimiento meridional.}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{Movimiento vertical.}$$

Ecuación de presión.

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \text{Tendencia de presión.}$$

Ecuación termodinámica.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{Cambio de la temperatura en el tiempo.}$$

La descripción completa de las ecuaciones de gobierno, algoritmos y condiciones de frontera, pueden ser consultadas en las notas técnicas de NCAR “*A description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*”. (NCAR/TN-398 + STR).

Referencias

- Anthes, R. A., 1986: The general question of predictability. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, P. S. Ray, E d., Amer. Meteor. Soc., 636-656.
- Aberson, Sim D., 1998: "Five-day tropical cyclone track forecasts in the North Atlantic basin" *Weather and Forecasting*, 13, pp.1005-1015
- Buizza, R., 1997: Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 99–119.
- CENAPRED, 2005: Ciclones Tropicales. Secretaría de Gobernación. Disponible en: <<http://video.cenapred.unam.mx/investigacion/rhyclones.php>>.
- Chien, F.-C., Y.-H. Kuo, and M.-J. Yang, 2002: Precipitation forecast of the MM5 in Taiwan area during the 1998 Mei-yu season. *Weather and Forecasting*. **17** , 739-754.
- CPTEC, 2005: O Sistema de Previsão de Tempo Global por Ensemble do CPTEC. Disponible en: <http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_ensemble.shtml>.
- DeMaria, 1997: Summary of the NHC/TPC Tropical Cyclone Track and Intensity Guidance Models, Tropical Prediction Center. Disponible en: <<http://www.tpc.ncep.noaa.gov/aboutmodels.shtml>>.
- Du, J., S. L. Mullen, and F. Sanders, 1997: Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2427-2459.
- Dudhia, J., Gill D., Manning K., Wei Wang, and Bruyere, C., 2004: PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 3), Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, USA.
- Davis, C. and S. Lownam, 2001: The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme. A report prepared for the Air Force Weather Agency (AFWA). 12pp.
- Ebert, E.E., 2001: Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2461-2480.
- Elsberry, R. L. 2002: Predicting Hurricane Landfall Precipitation: Optimistic and Pessimistic Views from the Symposium on Precipitation Extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83, 1333-1340.
- Elmore, K.L., D.J. Stensrud, and K.C. Crawford, 2002: Ensemble cloud model applications to thunderstorm forecasting. *J. Appl. Meteor*, **41**, 363-383.
- Elsner, J.B., 2003: Tracking hurricanes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 353-356.
- Emanuel, K.A., 1991: The theory of Hurricanes. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 23, 179-196
- Emanuel, K.A., 1986: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part 1: Steady-state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, 43, 585-604.

- Epstein, E., 1969: Stochastic dynamic prediction: *Tellus*. v. 21. No. 6 p. 734-751.
- ERN, Ingenieros Consultores, 2003: Reporte ERN-031201-H01, Informes de huracanes en México. Evaluación de Riesgos Naturales. Disponible en: <http://www.ern.com.mx/Inf_Hura.asp>.
- Farfan, L. M., and J. A. Zehnder, 1997: Orographic influence on the synoptic-scale circulations associated with the genesis of hurricane Guillermo (1991). *Mon. Wea. Rev.*, 125, 2683-2698.
- Gamache, J. F., R. A. Houze, Jr., and F. D. Marks, Jr., 1993: Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert. Part III: Water budget. *J. Atmos. Sci.*, 50, 3221-3243.
- Gelaro, R., R. Buizza, T.N. Palmer and E. Klinker, 1998: Sensitivity analysis of forecast errors and the construction of optimal perturbations using singular vectors. *J. Atmos. Sci.*, 55, 1012-1037.
- Gray, S.L., 1994: Theory of mature tropical cyclones: A comparison between Kleinschmidt (1951) and Emanuel (1986). JCOMM Rep. 40, Joint Centre for Mesoscale Meteorology, University of Reading, PO Box 240, Reading Berkshire RG6 2FN United Kingdom, 50pp.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn-State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-398 + STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 117 pp.
- Grimit, E. P. and C. F. Mass, 2002: Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the Pacific Northwest. *Wea. Forecasting*, 17, 192-205
- Hamill, T. M., and S. J. Colucci, 1998: Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 711-724.
- Hausman, S., 2001: Current MM5 Development and Operations at Headquarter Air Force Weather Agency. Workshop Program for the Eleventh PSU/NCAR MM5 Users' Workshop. Foothills Laboratory NCAR. June 25 - June 27 2001.
- Hou, D., E. Kalnay, and K.K. Droegemeier, 2001: Objective verification of the SAMEX '98 ensemble forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 73-91
- Jewson, S., and Caballero, R., 2003: The use of weather forecasts in the pricing of weather derivatives. *Meteorological Applications*, 10:377-389. Cambridge University Press. Royal Meteorological Society
- Kleinschmidt, E. Jr., 1951: Grundlagen einer Theorie des tropischen Zyklonen. *Arch. Meteorol., Geophys. Bioklimatol.*, Ser. A 4, 53-72. (An English translation may be found in Gray, 1994).
- Krishnamurti, T.N., Vijaya Kumar, T.S.V., Yun, W.T., Chakraborty, A., Stefanova, L., Cubukcu, N., Williford, E., Mackey, B. and Sanjay, J., 2003: Superensemble Forecast for Weather and Climate.
- Leith, C. E., 1974: Theoretical skill of Monte-Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 102, 409-418.
- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.*, v. 20, p. 130-141

- Lorenz, E. N., 1965: A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, v. 17, p. 321-333
- Lorenz, E. N., 1969: The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, v. 21, p. 289-307
- Mayfield, M., 1995: Hurricane Ismael, Tropical Cyclone Report, National Hurricane Center. Disponível em: <<http://www.nhc.noaa.gov/1995ismael.html>>.
- Mendonça, A.M., 1999: Desempenho do modelo global CPTEC/COLA durante episódios de ZCAS, utilizando os esquemas de convecção profunda tipo Kuo e Arakawa-Schubert Relaxada. São José dos Campos, 166 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Murphy, A. H., 1988: Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2417-2424.
- Palmer, T. N., 2002: The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: from days to decades. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 747-774.
- Pike and Neumann, 1987: Verification Methods, Bureau of Meteorology Research Centre, Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting, Chapt.3: Tropical Cyclone Motion. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/bmrc/pubs/tcguide/ch3/ch3_5.htm>.
- Ramamurthy, M.K., Jewett, B.F., and Liu, H., 2002: Ensemble Methods applied to hurricane track and intensity forecasting, Department of Atmospheric Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL. Disponível em: <<http://cyclone.atmos.uiuc.edu/Work/ensemble/>>.
- Roebber, P. J., D. M. Schultz, B. A. Colle, and D. J. Stensrud, 2004: Toward improved prediction: High-resolution and ensemble modeling systems in operations. *Wea. Forecasting*, **19**, 936-949
- Rotunno, R., and K.A. Emanuel, 1987: An air-sea interaction theory for tropical cyclones, Part II: Evolutionary study using axisymmetric nonhydrostatic numerical model. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 542-561.
- Scott, H., 2001: Models, models everywhere...literally, Meteorological Models Branch, Air Force Weather Agency. Disponível em: <https://afweather.afwa.af.mil/observer/JUL_AUG_2001/.html>.
- SEGOB, 2003: Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT CT). Disponível em: <<http://www.segob.gob.mx/templetas/actividades.php?fecha=2003-06-04&counter=1>>
- Stensrud, D.J., H.E. Brooks, J. Du, M.S. Tracton, and E. Rogers, 1999: Using ensembles for short-range forecasting. *Monthly Weather Review*, **127**, 433-446.
- Stewart, S. R., 2005: Hurricane Ivan, Tropical Cyclone Report, National Hurricane Center. Disponível em: <<http://www.nhc.noaa.gov/2004ivan.shtml?>>.
- Takacs, I.M. Navon, E. Kalnay, 1985: "High Latitude Filtering in a Global Grid-point Model Using Model Normal Modes", NASA Research Review 1984 - Global Modeling and Simulation Branch, 84-86

- Toth, Z., and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **225**.
- Tracton, M. S. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: Practical aspects. *Weather and Forecasting*, **8**, 379-398.
- Tribbia, J. J., and D. P. Baumhefner, 1988: The reliability of improvements in deterministic short-range forecasts in the presence of initial state and modeling deficiencies. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2276–2288.
- Velden, C.S., 1990: The impacts of satellite-derived winds on hurricane analysis and track forecasting. Preprints, *Fifth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, London, England, American Meteorological Society, 215-219
- Wandishin, M. S., S. L. Mullen, D. J. Stensrud, and H. E. Brooks, 2001: Evaluation of a short-range multi-model ensemble system. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 729-747.
- Wilches Chaux, G., 1989: Desastres, Ecologismo y Formación Profesional. SENA, Colombia.
- Whitaker, J. S., and A. F. Loughe, 1998: The relationship between ensemble spread and ensemble mean skill. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3292-3302.
- Whitaker, J.S., Loughe, A.F., 1993: The relationship between ensemble spread and ensemble mean skill. *Mon. Wea. Rev.*, v. **126**, p. 3292-3302
- Zhang, Z., and T. N. Krishnamurti, 1997: Ensemble forecasting of hurricane tracks. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2785-2795.
- Zoltan Toth and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. *Bull. Am. Met. Soc.*, **74**, 2317-2330.

Libros consultados

- Arfken, G. B., and Weber, H. A., 1995: *Mathematical Methods for Physicists* (4th edition), Academic Press. The standard text in mathematical physics.
- Diaz, H. F., 1997: *Hurricanes, Climate and Socioeconomic Impacts*. Edited by Henry F. Diaz, Roger S. Pulwarty, 292pp. ISBN: 3-540-62078-8.
- Holton, J. R., 1992: *An Introduction to Dynamic Meteorology* (3rd Edition), Academic Press, 511pp.
- Magaña, R. V., 2004: *Los Impactos de El Niño en México* (2da. Edición). Universidad Nacional Autónoma de México, 229 pp.
- Marks, F. D. Jr., 2003: *Hurricanes. Handbook of Weather, Climate and Water*. Thomas D. Potter (Editor), Bradley R. Colman (Editor). 31, 641-675. ISBN: 0-471-21490-6.

Kalnay, E., 2003: Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press, 341pp.

Salby, M. L., 1996: Fundamentals of Atmospheric Physics, Academic Press, 622pp.

Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 1977: Atmospheric Science: An Introductory Survey, Academic Press, 467pp.

Wilks, D. S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction (International Geophysics Series). Academic Press, 467pp. ISBN: 0127519653