



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**"GESTIÓN DE RIESGO EN PLATAFORMAS
PETROLERAS ANTE EVENTOS METEOROLÓGICOS
EXTREMOS"**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :

ORTIZ SALGADO RAÚL

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ERNESTO DOS SANTOS CAETANO NETO



México D.F. a 17 de agosto del 2011



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.

No quiero que aceptes el mundo tal como es. Quiero que lo inventes. Quiero que tengas ese talento. Crear tu propia realidad.

Chuck Palahniuk

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a quienes han hecho posible que esta tesis haya llegado a un excelente término.

Al Director de la misma, Dr. Ernesto dos Santos Caetano Neto, por su apoyo incondicional, orientación, amistad, paciencia y consejos dados para la realización de este trabajo.

A mis compañeros del Centro de Ciencias Atmosféricas, por las atenciones y recomendaciones recibidas en mi estancia en sus instalaciones: Armenia, Boris, Christian, Clemente, Daniela, Gustavo, Dr. Magaña, Matías, Violeta; en especial a Roberto que gracias a él tuve una mejor integración al equipo y por su constante paciencia al ayudarme en la elaboración de esta tesis.

A ciertos profesores de la Facultad de Ingeniería que me inspiraron con sus clases, me enseñaron a valerme por mi mismo, a creer en mí, gracias en verdad.

A mis compañeros de la Facultad de Ingeniería, por ayudarme, entenderme y ofrecerme su amistad: Alan “Doña”, Aliskair Anguiano, Alex “Ricky” Vázquez, Ana Rocher, Angel “Billy”, Arturo “Bala”, Astrid López, Bernie Pacheco, Carlos Gallardo, Carlos “Don” Jiménez, Chema Párrales, Claudia Gómez, Claudia Marttelo, Diana Rosado, Diego Quiroz, Enrique Moran, Gerardo Fonseca, Horacio López, Iván Duran, José Ávila, Juan Carlos “Chiquis”, Juan Carlos Sabido, Juancho Verdayes, Luz Reynaga, Manuel Cabrera, Ma. Teresa Vázquez, Mario Troche (QEPD), Manuel Cabrera, Marlene Pimentel, Mauricio Cruz, Miguel Ángel Rosete, Lalo Bautista, Rene Villalobos, Verónica Acevedo y demás compañeros que por mi incapacidad de recordar no los nombre.

A mi Padre (QEPD), Hermano (QEPD) y Madre por su apoyo incondicional, amor y sabiduría que me transmitieron.

A mis amigos que estuvieron conmigo brindándome su apoyo, consejos, fortaleza y cariño: Alaín Fragoso, Alejandra Guzmán, Alejandro “Lonch”, Alejandro “Bro”, Carmen Orosco, Fabiola Carvajal, Dr. Miguel A. Fragoso Reyes y su esposa, Mishel Pacheco, Obsbar Castellanos, Psic. Azucena, Sissi Fragoso, mi loro “Macorro”, si llego a omitir a alguien fue por falta de concentración más no de cariño.

A NCAR, NASA, CCA, NOAA, Google, que me ayudaron a concluir esta travesía.

En especial a mí amada Universidad Nacional Autónoma de México.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 5 |
| Capítulo 1.0. EVENTOS METEOROLÓGICOS EN EL GOLFO DE MÉXICO | 8 |
| 1.1. EL CLIMA | 8 |
| 1.1.1. Tiempo y Clima | 9 |
| 1.1.2. Sistemas Meteorológicos en el Golfo de México | 9 |
| 1.2. CLIMA DE INVIERNO | 10 |
| 1.2.1. Norte | 11 |
| 1.3. CLIMA DE VERANO | 13 |
| 1.3.1. Zona de Convergencia Intertropical “ZITC” | 14 |
| 1.3.2. Ondas del Este | 15 |
| 1.3.3. Huracán | 16 |
| 1.4. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS DE BAJA FRECUENCIA | 19 |
| 1.4.1. El Niño | 20 |
| 1.4.2. La Niña | 21 |
| 1.5. CAMBIO CLIMATICO | 22 |
| 1.5.1. Impacto del cambio climático en la actividad de los ciclones tropicales | 22 |
| Capítulo 2.0. IMPACTOS DE EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN ZONAS PETROLERAS | 24 |
| 2.1. HURACAN DEAN | 24 |
| 2.1.1. Análisis diagnóstico | 25 |
| 2.2 NORTE NO. 4 | 28 |
| 2.2.1 Análisis diagnóstico | 29 |
| Capítulo 3.0. DATOS Y METODOLOGÍA DEL MODELO ATMOSFÉRICO WRF . | 31 |
| 3.1. MODELO NUMÉRICO WRF | 31 |
| 3.2. APLICACIONES DEL WRF | 32 |
| 3.3. SISTEMA DE PRE-PROCESO “WPS” | 33 |
| 3.3.1. Parametrizaciones de los procesos físicos | 34 |
| 3.4. INICIALIZACION DEL MODELO WRF | 38 |
| 3.4.1. Modulo real.ex | 39 |
| 3.4.2. Modulo wrf.exe | 39 |
| 3.4.3. WRF Domain Wizard | 39 |

| | |
|--|----|
| 3.5. SISTEMA DE POST-PROCESO DEL WRF | 40 |
| Capítulo 4.0. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS EVENTOS | 41 |
| 4.1. MODELACIÓN DEL HURACAN DEAN | 41 |
| 4.1.1. Modelación de la física | 43 |
| 4.1.2. Trayectorias de la física | 53 |
| 4.2. MODELACIÓN DEL NORTE NO. 4..... | 54 |
| 4.2.1. Modelación de la física | 55 |
| Capítulo 5.0. RESULTADOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA AL SECTOR PETROLERO EN MÉXICO | 58 |
| 5.1. RESULTADO DE LAS SIMULACIONES | 58 |
| 5.2. INTEGRAL DE ENERGÍA CINÉTICA | 60 |
| 5.3. MAREAS DE TEMPESTAD Y POTENCIAL DESTRUCTIVO DE OLAS SDP..... | 61 |
| 5.4. POTENCIAL DE DAÑO DEL VIENTO WDP | 62 |
| 5.5. RESULTADOS DEL PROCESO DE IKE, SDP Y WDP PARA EL HURACAN DEAN..... | 62 |
| 5.6. RESULTADOS DEL PROCESO DE IKE, SDP Y WDP PARA EL NORTE NO. 4..... | 63 |
| 5.7. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA | 64 |
| CONCLUSIONES | 67 |
| ANEXO..... | 69 |
| BIBLIOGRAFÍA | 76 |

INTRODUCCIÓN

La amenaza de los huracanes y otros eventos extremos, con frecuencia obliga a los productores de petróleo y gas natural en el Golfo de México a evacuar las plataformas petroleras en alta mar y temporalmente suspender la producción. El uso de la información del tiempo a través de los pronósticos más precisos de estos eventos daría lugar a un decremento de falsas alarmas, evitando así evacuaciones innecesarias y las interrupciones en la producción.

El Golfo de México es una de las cuencas con más perspectivas de producción de gas y aceite en América del Norte. La infraestructura de gas y petróleo en el Golfo de México es sustancial, con 6400 pozos productores, 4000 activos (plataformas), y 29000 kilómetros de tuberías. Los gobiernos de la región predicen importantes aumentos de la producción, casi en su totalidad en aguas profundas que son particularmente vulnerables a las tormentas intensas (huracanes y Nortes). Por lo tanto, el valor de la información del pronóstico de eventos meteorológicos extremos, incrementará significativamente en el futuro con el aumento de la actividad productiva petrolera (Huracanes, Ciclones y tormentas, Semarnat).

Estimaciones hechas, durante la década de 1990, indican que el valor de la información del pronóstico de huracanes con antelación de hasta 48 horas en la industria petrolera fue, en promedio, de aproximadamente 8 millones de dólares al año. Lo que supera ampliamente el presupuesto operativo del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos de Norteamérica.

El anticipo puede reducir sustancialmente el impacto de estos eventos meteorológicos incluyendo la evacuación, la transferencia de activos móviles, como buques y aeronaves, y la preparación de las infraestructuras fijas. Sin embargo, los preparativos pueden incurrir en costes sustanciales. El coste de la evacuación civil en general se estima en aproximadamente 1 millón de dólares por milla (Whitehead 2003), pero puede ser tan alto como de 50 millones de dólares en algunas áreas (Adams y Berri, 2004). Baker resume los estudios de los costos de preparación en industrias específicas, que se ejecutan en decenas de millones de dólares. El costo de la evacuación de los buques de la Armada de Norfolk, Virginia, durante el huracán Floyd en 1999 se estimó entre 14 y 17 millones de dólares, durante el huracán Isabel en el año del 2003 generó gastos alrededor de 36 millones.

Desde una perspectiva de la industria, sin embargo, estos valores son una pequeña fracción de los costos de producción y de perforación. El valor pronóstico aumenta dramáticamente (más de 15 millones dólares) con una mejora del 50% en la precisión de la información del tiempo (hasta 48 [hr]) a través del utilización de modelos numéricos de pronósticos de tiempo simulado. La producción de petróleo crudo y gas natural en el Golfo de México son, literalmente, en la primera línea de los riesgos de huracanes. Los impactos de los huracanes sobre los productores de petróleo y de gas pueden ser considerables. Por ejemplo, el huracán Andrew en 1992 destruyó 13 plataformas de producción de gas y petróleo, cuatro de las cuales desaparecieron sin dejar rastro. Otras 40 plataformas fueron dañadas, y 5% del suministro de gas natural en los Estados Unidos tuvo una paralización temporalmente (McDonald, 1992).

Particularizando está el caso de la plataforma petrolera Deepwater Nautilus de la compañía Shell, con dimensiones de 119 por 94 [m], fue concebida para operar en océanos con olas de 10 [m] y vientos de hasta 94 [km/h], cuando ocurrió el huracán Katrina sus vientos superaron los 250 [km/h] lo que provocó que la mandara a la deriva a lo largo de 148 [km] hacia el este (Guy Cantwell, Transocean), la enorme estructura metálica cuyo valor es de decenas de millones de dólares fue rastreada en todo momento evitando la pérdida total de está. Este mismo fenómeno meteorológico provocó en Shell que cerraran plantas como la refinería de Motiva Convent, la refinería de Motiva Norco, la planta química de Norco, la planta química de Geismar y la planta química de Mobile. La unidad de craqueo catalítico fluido que produce 67000 barriles por día en la refinería de Shell Deer Park Refining Co. en Deer Park, Texas opero a una tasa reducida, esta refinería es una empresa conjunta entre Shell Oil y PEMEX.

En 1982 una tormenta en el Atlántico norte, conocida como la Tormenta Ocean Ranger, causó la volcadura una plataforma petrolera situada cerca de los Grand Banks, Terranova, que resultó en la trágica muerte de toda la tripulación de 84 trabajadores (El rol del estado en emergencia por catástrofes, 2006.). Los huracanes Gustav e Ike provocaron la destrucción de 60 plataformas de petróleo y de producción de gas natural en el Golfo de México, otras 31 plataformas requirieron de 3 a 6 meses de reparaciones, mientras que otras 93 plataformas necesitaron mínimo 3 meses de reparaciones. En comparación, en el año 2006, los huracanes Katrina y Rita destruyeron 115 plataformas y dañaron otras 52. The Department of Interior's Minerals Management Service (por sus siglas en ingles MMS) anunció su evaluación final de los daños el 26 de noviembre 2008, señalando que las plataformas destruidas representan el 1.05% de la producción de petróleo en el Golfo de México y el 1.3% de la producción de gas natural (Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy).

Si se continuara con la lista de ejemplos ésta sería enorme, para el caso de este trabajo se enfocará en casos particulares que afectaron a la paraestatal mexicana PEMEX, con la ayuda de un modelo numérico atmosférico. La modelación atmosférica tiene relación con cálculos matemáticos; es decir, la atmósfera se rige por ecuaciones físicas que necesitan ser resueltas para describir qué es lo que va a ocurrir a futuro a partir de las condiciones originales, estas ecuaciones son procesadas con sistemas tecnológicos, para determinar cuál será el estado de la atmósfera en el futuro, permitiendo así realizar pronósticos y analizar casos climáticos que ocurrieron en el pasado.

Al obtener los resultados de las simulaciones es factible operar con ellos usando diversas teorías que den parámetros de los daños que ocasionen estos fenómenos a las plataformas petroleras, la escala de Saffir-Simpson clasifica los huracanes según la intensidad del viento e indica el daño que puede realizar a la zona afectada, en esta tesis se propone un ajuste a esta escala con ayuda de teorías como del científico Mark Powell, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de huracanes (NOAA) que propone una revisión a la clasificación dada por Saffir-Simpson; correlacionando con una escala de afectación del viento a estructuras metálicas.

Es indudable decir que las amenazas naturales como los desastres meteorológicos que ocurren son parte integral de la vida de cualquier cultura o sociedad, en ese caso la historia de México no varía en nada de la regla general, los huracanes han cobrado miles de víctimas y han ocasionado la pérdida de muchos

millones de dólares, dado esta alta fragilidad en el área frente a estos imprevisto es básico que exista un estudio óptimo de la evolución del manejo de desastres que beneficien a la infraestructura petrolera mexicana.

Este estudio desarrolla un esquema de alerta temprana basándose en los estudios antes mencionados, dando la posibilidad de saber con qué aproximación un evento meteorológico podría causar daño a estas instalaciones y evitando riesgos futuros que afecten específicamente a la industria y actividades petroleras en el Golfo de México, caso particular de PEMEX.

1.0. EVENTOS METEOROLÓGICOS EN EL GOLFO DE MÉXICO

Eventos hidrometeorológicos extremos como tormentas tropicales, huracanes, Nortes y otros, son un gran peligro de carácter natural, que causan una enorme cantidad de daños económicos y pérdidas de vida en todo el mundo y particularmente en la región del Atlántico Norte Tropical. Por lo tanto, es vital entender y tener la capacidad de predecir con confiabilidad estos fenómenos utilizando modelos matemáticos de la atmósfera. La calidad de las predicciones ha mejorado significativamente en la última década, debido a grandes inversiones en supercomputación y en los sistemas de observación globales usando tecnologías de satélites. ¿Cómo pueden los resultados de estas inversiones tener un uso rentable por el sector de petróleo y gas?

La calidad de los pronósticos de tiempo y principalmente de eventos extremos son esenciales para la gestión de operaciones en la actividad petrolera tanto en zonas costeras como en alta mar. Los huracanes en el Golfo de México han causado la interrupción repetida en la producción de petróleo y gas en la industria en la zona, sin embargo, no solamente los fenómenos tropicales azotan esta región, los Nortes también pueden tener un fuerte impacto en la infraestructura instalada en el Golfo de México.

La generación de las condiciones atmosféricas precisas y actualizadas de fácil asimilación y comprensión para los operadores en las plataformas, es crucial para evitar desastres y minimiza la interrupción de las operaciones en el futuro. La información precisa a través de modelación matemática de la atmósfera requiere un conocimiento previo y profundo de los fenómenos que suelen azotar la región de estudio. Esto permite una mejor aplicación y configuración de los modelos atmosféricos donde los procesos físicos relevantes son adecuadamente considerados en la modelación

En este capítulo se presenta un análisis de los fenómenos hidrometeorológicos y su variabilidad climática en el Golfo de México y zonas costeras donde se encuentra instalada la infraestructura de empresas petroleras. Posibles impactos y escenarios a futuro ante al cambio climático son también discutidos.

1.1. EL CLIMA

La palabra clima viene del griego klima, que hace referencia a la inclinación del Sol. El clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan las condiciones habituales o más probables de un punto determinado de la superficie terrestre, es, por tanto, una serie de valores estadísticos.

Las áreas de tierra firme y las marinas, al ser tan variables, reaccionan de modos muy distintos ante la atmósfera, que circula constantemente en un estado de actividad dinámica. Las variaciones día a día en un área dada definen su climatología, mientras que el clima es la síntesis a largo plazo de esas variaciones. El clima se mide por medio de termómetros, pluviómetros, barómetros y otros instrumentos, pero su estudio depende básicamente de las estadísticas.

Además de los efectos de la radiación solar y sus variaciones, el clima siempre está bajo la influencia de la compleja estructura y composición de la atmósfera y de los mecanismos por los que ésta y los océanos transportan el calor. Así pues, para cualquier área dada de la Tierra, debe considerarse no sólo su latitud (que determina la inclinación del Sol), sino también su altitud, el tipo de suelo, la distancia del océano, su relación con sistemas montañosos y lacustres, y otras influencias similares (Lorenz, Edward, 1972).

1.1.1. Tiempo y Clima

¿Cuál es la diferencia entre el tiempo y el clima?

La diferencia entre el tiempo y el clima es una medida de tiempo. El tiempo son las condiciones de la atmósfera en un corto período de tiempo, y el clima es la forma en que la atmósfera se comporta en periodos relativamente largos de tiempo. Una interpretación más moderna de la diferencia entre el tiempo y el clima es dada por Lorenz donde afirma que, “tiempo es el que tenemos; mientras clima es el que esperamos.”. La figura 1.1. ilustra de una forma esquemática los dos componentes de la variabilidad atmosférica (García Concepción, Omar, 2007).

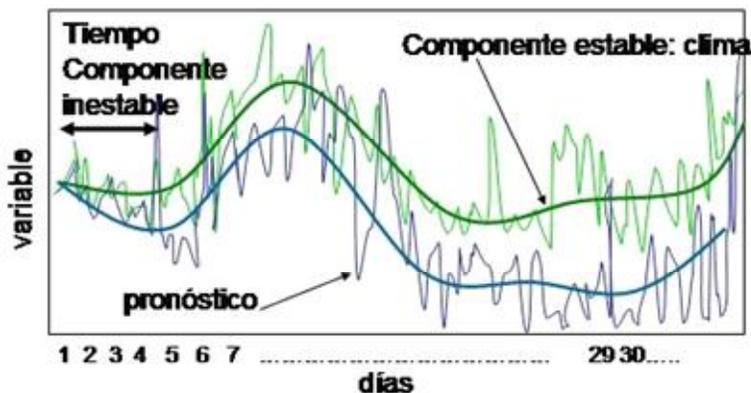


Figura 1.1. Diferencia entre el tiempo y el clima. (Fuente: Landa et al, 2008)

Así pues, el tiempo traduce algo que es instantáneo, cambiante y en cierto modo irrepetible; el clima, en cambio, aunque se refiere a los mismos fenómenos, los convierte a una dimensión más permanente, duradera y estable.

1.1.2. Sistemas meteorológicos en el Golfo de México

El Golfo de México es una cuenca marítima contenida entre los litorales de México, Estados Unidos y Cuba. La región del Golfo cubre aproximadamente 600,000 kilómetros cuadrados, que mide aproximadamente 1601.30 kilómetros de este a oeste, 901.20 kilómetros de norte a sur.

La cuenca del Golfo de México se asemeja a una gran fosa poco profunda con un borde ancho. Aproximadamente el 38% de las aguas del Golfo son poco profundas en las zonas intermareales -- La zona intermareal es la que queda sometida al ritmo diario de las mareas--. Las aguas de la plataforma continental (<200 [m]) y talud continental (200-3000 [m]) representan el 22% y 20% respectivamente, y las zonas abisales profundas de 3000 metros componen el 20% final. Ubicado en el cuadrante suroeste, el “Deep Sigsbee” es la región más profunda del Golfo de México y contiene profundidades de hasta 4384 [m]. La media (promedio) de profundidad de agua del Golfo es de 1615 [m] aproximadamente y la cuenca contiene un volumen de 2434000 [km³] de agua.

En el caso de la parte continental de México, el clima está altamente influenciado por el comportamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (por sus siglas ZCIT), las Ondas del Este, los ciclones tropicales, los Nortes, así como por los procesos oceánicos relacionados con las albercas de agua caliente del Atlántico (Caribe) y del Pacífico del este. Parte importante de la dinámica de la atmósfera son también las interacciones entre trópicos y extra-trópicos. Los Nortes son una manifestación de dicha interacción (Vázquez Aguirre, Jorge, 1999).

Estos eventos producen cambios extremos en los estados del tiempo, los vientos llegan a ser tempestuosos; hay una repentina baja de temperatura, y lluvia torrencial, algunas veces acompañada de granizo, truenos, y relámpagos. El aire caliente procedente del Frente produce nubes cúmulo o cumulonimbus, así como tempestades, puede notarse que la temperatura es más fría, la humedad relativa del aire es muy elevada, pues frecuentemente alcanza el 80% e incluso el 100%. En la zona tropical se produce un movimiento ascendente del aire debido a su calentamiento. Esta ascensión del aire origina las lluvias de convección. Además, la zona tropical es el lugar de convergencia de los alisios. Las precipitaciones oscilan entre los 400 y los 1000 [mm] anuales, aunque la variedad de clima monzónico alcanza valores muy superiores.

1.2. CLIMA DE INVIERNO

En invierno se presentan ciclones de gran escala en latitudes medias que afectan principalmente el norte del país. En ocasiones, estos sistemas se propagan hacia el sur, sobre el Golfo de México y el Caribe, provocando bajas de temperatura, vientos intensos y lluvias, desde Veracruz, hasta la península de Yucatán, pudiendo incluso alcanzar Centroamérica. Dichas condiciones se conocen comúnmente como Nortes, estos fenómenos tienen un poder de afectación que modifica radicalmente la navegación como la producción de petróleo en el Golfo de México (Lahoud, Gustavo, 2006).

Los Nortes pueden tener impactos similares a los de las tormentas tropicales de verano. Uno de los ejemplos más claros de años recientes lo constituyó el accidente de la plataforma petrolera Usumacinta de PEMEX en octubre de 2007. Olas de hasta 8 metros de altura y vientos de 36.10 [m/s] asociados a un Norte, provocaron un accidente en una plataforma petrolera en el Golfo de México que costó la vida de más de veinte trabajadores (PEMEX, Informe Molina) (Fig. 1.2.).



Figura 1.2. Plataforma Usumacinta de PEMEX. (Fuente: PEMEX)

El avance científico ha logrado la comprensión los Nortes (Fig. 1.3.), lo que ha permitido realizar mejores pronósticos del tiempo a corto y mediano plazo. Los programas de Protección Civil se han beneficiado con la información de pronóstico de ondas frías y Nortes.

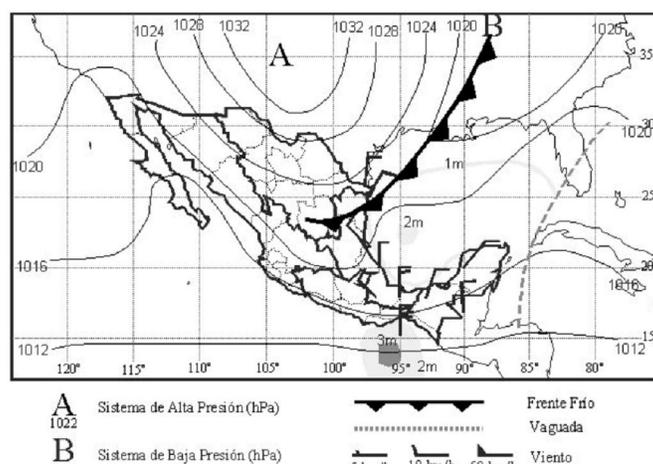


Figura 1.3. Patrón de vientos en superficie y líneas de presión de superficie durante una condición promedio de Norte. (Fuente: Magaña et. al., 1999)

1.2.1. Norte

La penetración de los sistemas de latitudes medias a los trópicos aumenta su frecuencia, por lo que se observa la entrada de frentes fríos sobre México (Fig. 1.4.). El desplazamiento de estos sistemas hacia el sur, sobre el Golfo de México, provoca bajas de temperatura y a veces, lluvias desde Veracruz hasta Yucatán y Centroamérica. Esta actividad frontal, está estrechamente relacionada con la presencia de vientos intensos, dando lugar a los Nortes. De este modo, aunque el invierno se distingue por las condiciones secas en la mayor parte de la región, se puede hablar de un régimen de lluvias para el invierno sobre la vertiente del Golfo de México (Breña Puyol, Agustín, 2004).

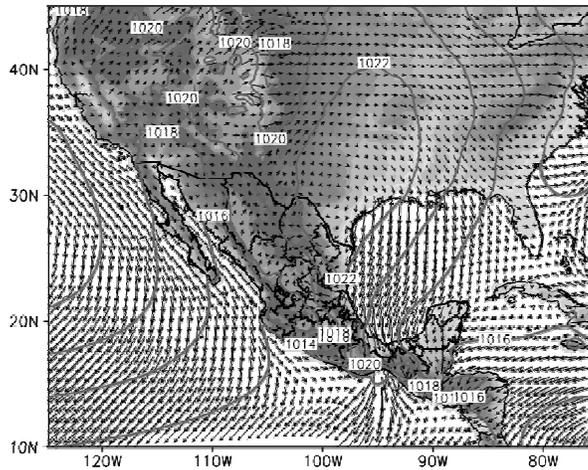


Figura 1.4. Configuración sinóptica de la entrada de un Norte. (Fuente: CFE)

Los elementos sinópticos que caracterizan a un norte son:

- a) Un sistema de alta presión que se desplaza sobre los Estados Unidos del noroeste al sureste, esto es, desde las montañas Rocallosas hasta la península de Florida.
- b) Vientos intensos que soplan de norte a sur en el Golfo de México y que se canalizan por el Istmo de Tehuantepec, para finalmente afectar el Pacífico al sur de México, donde producen mezclado superficial del océano (Trasviña et al., 1997).
- c) Descensos en la temperatura superficial, ocasionados por el desplazamiento de la masa de aire polar continental hacia latitudes bajas.
- d) Precipitación sobre el sureste de México, la cual puede variar en intensidad.

Los eventos de Norte tienen como características fuertes vientos, oleaje y algunos presentan una intensa precipitación que causan enormes daños socioeconómicos. Dos ejemplos notables fueron el Norte asociado con la súper tormenta de 12-14 de marzo de 1993 y el Norte de 23 de octubre de 2007 sobre las costas de Campeche, Tabasco y Veracruz. Ráfagas de vientos en superficie de 30 [m/s] y oleaje de 6 [m] fueron observados (Boletín meteorológico, Servicio Meteorológico Nacional de México).

La frecuencia (Fig. 1.6a. y Fig. 1.6b.) de eventos de Nortes en promedio es alrededor de 21 a 22 eventos anuales para los dos tipos de reanálisis utilizados (NARR, para el periodo de 1979-2005 y; NCEP 1948-2008).

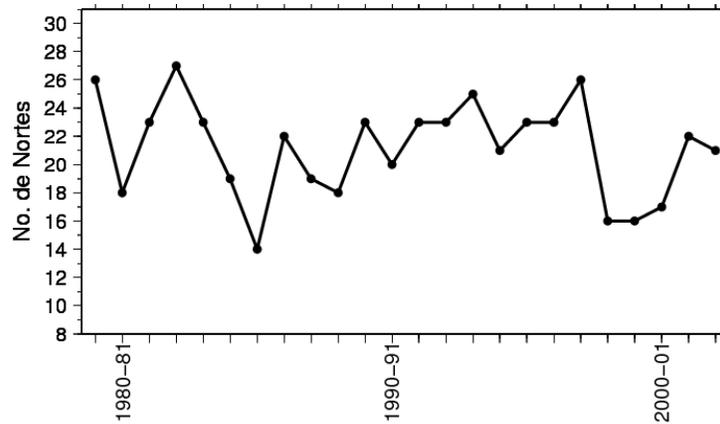


Figura 1.6a. Frecuencia de eventos de Nortes (1979-2003) de acuerdo a reanálisis.
(Fuente: NARR)

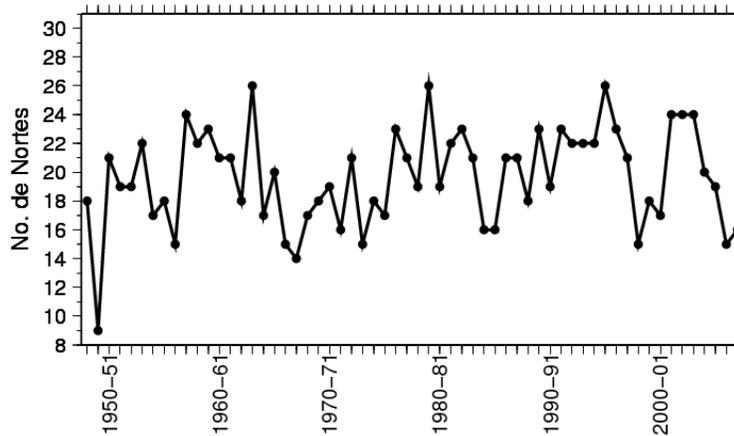


Figura 1.6b. Frecuencia de eventos de Nortes (1948-2008) de acuerdo a reanálisis.
(Fuente: NARR)

Los Nortes, por estar asociados a una onda de latitudes medias penetrando a los trópicos, producen un descenso de temperatura. Esta caída de temperatura se debe a una penetración de la masa de aire frío. Por lo anterior, los días con descensos de temperatura en el periodo invernal están con frecuencia asociados al paso de frentes fríos. Por tanto, un Norte está relacionado a disminuciones rápidas en la temperatura, lo que se establece como primer criterio objetivo para identificar a estos sistemas.

Si bien los descensos diarios de temperatura media pueden ser útiles para identificar la ocurrencia de nortes, es necesario analizar con cuidado el significado físico del uso de la temperatura. (Vázquez Aguirre J. Luis, 1999).

1.3. CLIMA DE VERANO

En una gran parte de México, las lluvias más intensas ocurren durante el verano y las condiciones mayormente secas durante el invierno, se habla de que México tiene

un clima monzónico. Entre junio y octubre los sistemas meteorológicos a considerar en el estudio del clima incluyen:

- I. La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)
- II. Las Ondas del Este “Onda Tropical”
- III. Los huracanes en el Pacífico, el Caribe y Golfo de México.

Como parte del ciclo anual de las lluvias de verano, en la región centro-sur de México y hasta Centroamérica, se observan dos máximos en la precipitación de verano, uno en junio y otro en septiembre, dando lugar a un mínimo relativo entre julio y agosto conocido como sequía intraestival, sequía del medio verano, canícula o veranillo (Magaña et al., 2005).

Gran parte de la dinámica atmosférica de verano en la costa del Pacífico mexicano está relacionada con la ZCIT, en el Pacífico del este. Su posición, así como la intensidad y densidad de la convección profunda en esta región puede resultar en periodos de lluvias fuertes o de sequías sobre Mesoamérica. En esta zona también tiene lugar gran actividad ciclogénica, formándose Ondas del Este y huracanes que producen fuertes lluvias.

1.3.1. Zona de Convergencia Intertropical “ZITC”

La zona de convergencia intertropical (por sus siglas ZCIT) es una franja de bajas presiones y actividad convectiva ubicada en la zona tropical (5-10° N), en donde confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste y las masas de aire son forzadas a ascender originando abundante nubosidad y fuertes precipitaciones. La ZCIT no es uniforme ni continua. Se puede interrumpir y su grosor variar de un sitio a otro, así como su comportamiento cambia de zonas marítimas a continentales (Fig. 1.7.).

El contraste entre la alberca de agua caliente en el Pacífico, frente a las costas de México y aguas frías sobre el ecuador produce un gradiente meridional de presión que acelera las parcelas hacia el norte produciendo la convergencia de humedad que genera la ZCIT. El desplazamiento meridional de la ZCIT hacia el norte marca el inicio de las lluvias de verano en el sur de México y en Centroamérica. Éste ocurre generalmente a finales de mayo en el sur del país.

En algunas regiones del noroeste mexicano, el paso de un ciclón tropical puede significar que las lluvias del verano sean hasta unos 20% más intensas que si no pasara ninguno de estos sistemas. Aún más, si los huracanes pasan frente a las costas mexicanas, pero a una cierta distancia (p. ejem. > 1000 [km]), el sistema sólo “succiona” la humedad de los alrededores, incluyendo las posibles lluvias sobre continente, por lo que las lluvias en zonas continentales pueden estar hasta un 20% por debajo de la media de verano.

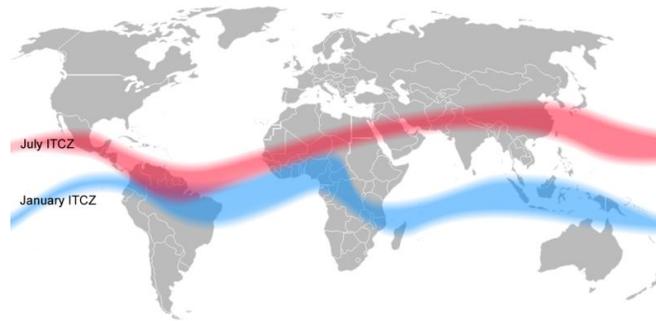


Figura 1.7. La Zona de Convergencia Intertropical. (Fuente: Fondear.org)

El desplazamiento estacional de la ZCIT determina el acercamiento o alejamiento de masas de aire, de tal manera que cuando ésta se desplaza a mayores latitudes, las precipitaciones se hacen más estacionales. Durante la primavera y el verano austral (octubre hasta abril) la ZCIT se dirige hacia el sur, haciendo que las masas de aire cálido y húmedo se presenten como nubes cumulonimbos, sobre todo en la región oriental del Perú. Por el contrario, durante el otoño e invierno (mayo hasta agosto), la ZCIT se desplaza hacia el hemisferio norte, alejándose del país las masas ecuatoriales, y aproximándose en su lugar los anticiclones del sur. Esta alternancia explica los regímenes estacionales de precipitación, temperatura y vientos presentes en el área de estudio.

1.3.2. Ondas del Este

Una Onda Tropical u Onda del Este en el Océano Atlántico es un tipo de vaguada, es decir, un área alargada de relativa baja presión orientada de norte a sur. Se mueve de este a oeste a través de los trópicos causando áreas de nubes y tormentas que se observan por lo general detrás del eje de la onda. Las ondas tropicales son transportadas hacia el oeste por los vientos alisios, que soplan paralelos a los trópicos, y pueden conducir a la formación de ciclones tropicales en las cuencas del Océano Atlántico norte y del Pacífico nororiental (Fig. 1.8.).

Sin embargo, algunos resultados recientes indican que parte de las Ondas del Este se pueden formar en el Caribe mismo, por inestabilidad barotrópica de la corriente en chorro de niveles bajos que se forma en esta región. Quizá el aspecto más conocido de las ondas del este es que algunas de ellas generan ciclones tropicales, no sólo en el Atlántico y el Golfo de México, sino también en la costa del Pacífico mexicano. Aproximadamente el 60% de los ciclones tropicales se originan a partir de ondas tropicales, y cerca del 85% de los huracanes más intensos (de categoría 3 y más, en la escala de huracanes de Saffir-Simpson) del Atlántico se desarrollan de Ondas del Este (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, 2008).



Figura 1.8. Evolución esquemática de una onda tropical. (Fuente: AOML)

Las Ondas Tropicales son los sistemas que permiten la presencia de las lluvias de temporada en el lado del Golfo de México y del Caribe. Frecuentemente ayudan al desarrollo de tormentas que pueden desarrollarse a ciclones tropicales (Fig. 1.9.).



Figura 1.9. Ondas tropicales afectando parte suroeste de la republica mexicana. (Fuente: Servicio Meteorológico Nacional)

1.3.3. Huracán

Se trata de una perturbación ciclónica de área variable con un centro de baja presión atmosférica, "el ojo", alrededor del cual soplan vientos de una gran velocidad. Los huracanes son ciclones tropicales con vientos mayores a 32.5 [m/s], pueden durar hasta dos semanas bajo las condiciones atmosféricas apropiadas (Fig. 1.10.).



Figura 1.10. Plataforma después del Huracán Lili. (Fuente: BBC News)

El termino huracán es procedente del Caribe, donde los antiguos indios del grupo lingüístico de los Arawak lo llamaban "Hunraken", forma para nombrar a los ciclones tropicales bien organizados en el Océano Atlántico y en el Pacífico Oriental.

Los huracanes se caracterizan y funcionan por lo que se conoce como núcleo cálido, que consiste en la liberación de grandes cantidades de calor latente de vaporización que se eleva, lo que provoca la condensación del vapor de agua. Este calor se distribuye verticalmente alrededor del centro de la tormenta. Las principales partes de un huracán son el ojo, la pared del ojo y las bandas lluviosas (Fig. 1.11.).

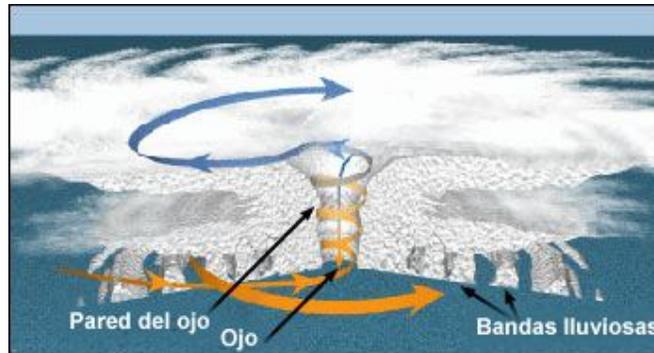


Figura 1.11. Estructura de un huracán. (Fuente: Cienciorama.UNAM)

La temporada de huracanes en la cuenca del Atlántico comienza el 1 de junio y termina el 30 de noviembre. Esta cuenca comprende el Mar Caribe, el Golfo de México y el Océano Atlántico.

El huracán obtiene su energía del calor y de la humedad del agua de mar; en general sólo se forma cuando la temperatura de ésta es mayor a 26.5 °C, lo que explica el debilitamiento de los huracanes al acercarse a aguas más frías o al entrar en tierra. Para la formación de estos fenómenos se requieren tres condiciones básicas: Humedad, Calor y Circulación de vientos hacia un mismo centro. Un huracán nunca se forma en tierra firme, porque la humedad que necesita solo se consigue sobre los mares y océanos. La temperatura debe ser muy alta para que se logre formar el sistema, de lo contrario no alcanzaría a desarrollarse la zona de baja presión. En la llamada zona de confluencia intertropical se favorece la formación de estos fenómenos por el encuentro de los vientos alisios noroccidentales del hemisferio norte, además de las altas temperaturas y la humedad que se produce en dicha zona (Gray, William M., 1967).

Al producirse la colisión de los vientos alisios, la rotación terrestre hace que el aire se desplace en dirección contraria a las agujas del reloj, mientras que en el hemisferio sur este movimiento sigue la dirección de horaria habitual.

Dadas las condiciones antes mencionadas, la formación de los huracanes se inicia cuando el aire húmedo calentado se eleva desde la superficie de los mares tropicales calientes, a manera de corriente ascendente natural. A medida que este aire húmedo va ascendiendo, se enfría y se condensa en forma de lluvia. Esta condensación hace pasar al aire grandes cantidades de calos que incrementan la fuerza de las corrientes ascendentes. De la tormenta y avivan la potencia del huracán (Fig. 1.12.).



Figura 1.12. Climatología de la trayectoria de huracanes. (Fuente: NOAA)

De esta manera, se forman bandas de precipitación que permiten que el aire se siga calentando y ascendiendo en la atmósfera. Si los vientos a grandes alturas son débiles, esta estructura puede permanecer intacta y las condiciones se pueden mantener propicias para que se siga intensificando. Estos violentos remolinos de nubes y vientos pueden alcanzar velocidades de más de 33.4 [m/s] y, en ocasiones, pueden exceder los 69.5 [m/s].

Los huracanes se clasifican de acuerdo a una escala conocida como Saffir-Simpson. (Tabla 1.1.) Ésta les otorga un número entre 1 y 5 que se basa en la velocidad de los vientos (1 es la menos intensa -vientos de 33.05 a 42.5 [m/s]- y la categoría 5 es la más intensa -vientos mayores que 69.4 [m/s]-). Cuando la intensidad de un ciclón tropical supera la clasificación de Tormenta tropical, se convierte en un huracán. Las cinco categorías, en orden ascendente de intensidad son:

| | | | | | |
|---|-----------------------------|--|----------------|-----------------------|---------------|
|  Categoría 1 | Velocidad del viento | 33–42 [m/s] | 119–153 [km/h] | 64–82 [kt] | 74–95 [mi/h] |
| | Marea | 1.2–1.5 [m] | | 4–5 [ft] | |
| | Presión central | 980 [hPa] | | 28.94 [pulg Hg] | |
| | Nivel de daños | Sin daños en las estructuras de los edificios. Daños básicamente en casas flotantes no amarradas, arbustos y árboles. Inundaciones en zonas costeras y daños de poco alcance en puertos. | | | |
|  Categoría 2 | Velocidad del viento | 43–49 [m/s] | 154–177 [km/h] | 83–95 [kt] | 96–110 [mi/h] |
| | Marea | 1.8–2,4 [m] | | 6–8 [ft] | |
| | Presión central | 965–979 [hPa] | | 28.50–28.91 [pulg Hg] | |
| | Daños potenciales | Daños en tejados, puertas y ventanas. Importantes daños en la vegetación, casas móviles, etc. Inundaciones en puertos así como ruptura de pequeños amarres. | | | |

| | | | | | |
|---|-----------------------------|--|----------------|-----------------------|----------------|
|  Categoría 3 | Velocidad del viento | 50–58 [m/s] | 178–209 [km/h] | 96–113 [kt] | 111–130 [mi/h] |
| | Marea | 2.7–3,7 [m] | | 9–12 [ft] | |
| | Presión central | 945–964 [hPa] | | 27.91–28.47 [pulg Hg] | |
| | Daños potenciales | Daños estructurales en edificios pequeños. Destrucción de casas móviles. Las inundaciones destruyen edificaciones pequeñas en zonas costeras y objetos a la deriva pueden causar daños en edificios mayores. Posibilidad de inundaciones tierra adentro. | | | |
|  Categoría 4 | Velocidad del viento | 59–69 [m/s] | 210–249 [km/h] | 114–135 [kt] | 131–155 [mi/h] |
| | Marea | 4.0–5,5 [m] | | 13–18 [ft] | |
| | Presión central | 920–944 [hPa] | | 27.17–27.88 [pulg Hg] | |
| | Daños potenciales | Daños generalizados en estructuras protectoras, desplome de techados en edificios pequeños. Alta erosión de bancales y playas. Inundaciones en terrenos interiores. | | | |
|  Categoría 5 | Velocidad del viento | ≥70 [m/s] | ≥250 [km/h] | ≥136 [kt] | ≥156 [mi/h] |
| | Marea | ≥5,5 [m] | | ≥19 [ft] | |
| | Presión central | <920 [hPa] | | <27.17 [pulg Hg] | |
| | Daños potenciales | Destrucción de techados completa en algunos edificios. Las inundaciones pueden llegar a las plantas bajas de los edificios cercanos a la costa. Puede ser requerida la evacuación masiva de áreas residenciales. | | | |

Tabla 1.1. Categorías de huracanes.

1.4. SISTEMAS ATMOSFÉRICOS DE BAJA FRECUENCIA

La mayoría de los sistemas ecológicos, sociales y económicos son sensibles a las fluctuaciones en el clima, a veces sin importar si estas son de gran o mediana intensidad, o de corta o larga duración. Aunque nuestro conocimiento sobre los impactos que la variabilidad climática global tiene en México ha aumentado en la última década, aun es difícil cuantificar sus costos, pues los estudios existentes rara vez toman en cuenta las interacciones entre los sistemas sociales, económicos y naturales. Las variaciones que el clima en México exhibe año con año están en gran medida determinadas por la ocurrencia del fenómeno de “El Niño” y “La Niña”.

Actualmente se tiene el conocimiento de una mayor actividad de Nortes durante los episodios “El Niño”. Durante “La Niña” hay menos Nortes, siendo más lentos pero de mayor intensidad y de mayor impacto, como en Octubre de 2007 (Dirección Meteorológica de Chile). Hoy se sabe que a largo plazo hay una cierta tendencia a más Nortes en el Golfo de México aunque con una gran variabilidad interanual.

1.4.1. El Niño

Se conoce con el nombre de "El Niño", no solamente a la aparición de corrientes oceánicas cálidas en las costas de América, sino a la alteración del sistema global océano-atmósfera que se origina en el Océano Pacífico Ecuatorial (es decir, en una franja oceánica cercana al Ecuador), generalmente durante un periodo comprendido entre diciembre y marzo.

Este fenómeno se presenta a intervalos de dos a siete años y se caracteriza porque la superficie del mar y la atmósfera sobre él presentan una condición anormal durante un período que va de doce a dieciocho meses. El fenómeno se inicia en el Océano Pacífico Tropical, cerca de Australia e Indonesia, y con él se altera la presión atmosférica en zonas muy distantes entre sí, se producen cambios en la dirección y en la velocidad de los vientos y se desplazan las zonas de lluvia en la región tropical. Durante El Niño, la formación de nubes y precipitación también emigra hacia América pues, como ya se mencionó, en la atmósfera se produce una alteración del patrón de la presión atmosférica, que baja en el lado este del Pacífico y sube en el oeste.

A la aparición y desplazamiento del máximo de temperatura de la superficie del océano Pacífico se le ha nombrado más recientemente "episodio cálido" y al sube-baja de la presión, Oscilación del Sur. Modernamente se nombra al fenómeno ENOS (ENSO en inglés), acrónimo de El Niño, Oscilación del Sur, denotando con ello el conjunto de alteraciones en los patrones normales de circulación del océano y la atmósfera. (Climate Prediction Center, NOAA) (Fig. 1.13.)

Los efectos de El Niño en el territorio mexicano están íntimamente ligados a la disponibilidad de agua. La escasez de lluvia en ciertos años es quizá la señal más evidente de El Niño. Son los costos de la sequía los que más se resienten en México. Por otra parte, la aparición de La Niña, con lluvias generalmente abundantes, lleva a creer que el clima vuelve a la normalidad. Esta llamada normalidad sin embargo, debe comprenderse como un estado cambiante, que en ocasiones alcanza extremos de Niño y en otras condiciones de Niña o de ninguno de los dos (Magaña et al, 1993).

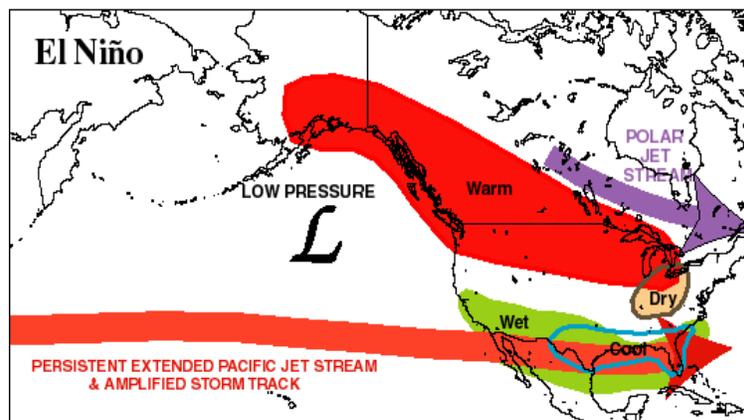


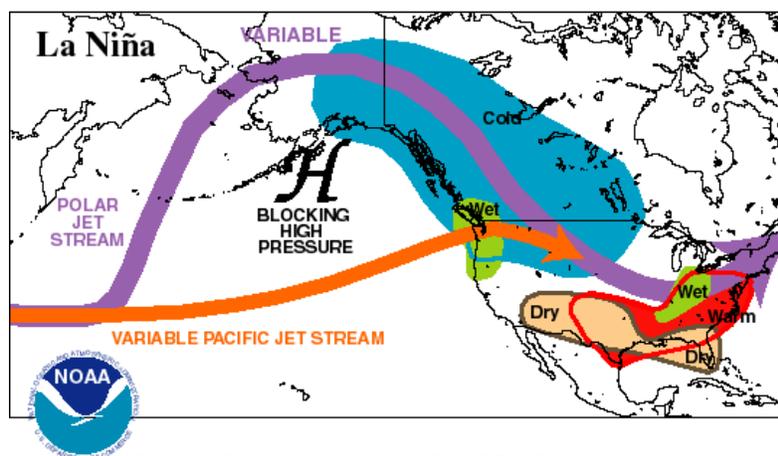
Figura 1.13. Circulación atmosférica durante "El Niño". (Fuente: NOAA)

1.4.2. La Niña

La Niña se caracteriza por una anomalía negativa de la temperatura de la superficie del mar. Los episodios de La Niña también producen cambios a gran escala en los vientos atmosféricos sobre el Océano Pacífico Tropical, incluyendo un incremento en la intensidad de los vientos Alisios del Este en la atmósfera baja sobre el océano Pacífico Oriental, y de los del oeste en la atmósfera superior. Durante un episodio de La Niña, es típico observar condiciones más secas respecto a lo normal sobre el océano Pacífico Ecuatorial Central, debido a un debilitamiento de la corriente en chorro durante los meses de diciembre a febrero, y por el fortalecimiento de los sistemas monzónicos en Australia/Sudeste de Asia, América del Sur/Centroamérica y África.

Los vientos alisios anormalmente intensos ejercen un mayor efecto de arrastre sobre la superficie del océano aumentando la diferencia de nivel del mar entre ambos extremos del Pacífico ecuatorial. De este modo el nivel del mar disminuye en las costas de Colombia, Ecuador, Perú y norte de Chile y aumenta en Oceanía. Como resultado de la intensificación de la surgencia de aguas relativamente frías a lo largo del Ecuador, la temperatura superficial del mar disminuye por debajo del valor medio climatológico. La presencia de aguas relativamente más frías en este sector constituye la evidencia más directa de la presencia del fenómeno La Niña (Fig. 1.14.).

En México, provoca lluvias excesivas en el centro y sur del país, sequías y lluvias en el norte de México, e inviernos con marcada ausencia de lluvias, la anomalía puede contribuir a una mayor actividad de huracanes en el Atlántico al disminuir los cortes de viento verticales en el mar Caribe y el océano Atlántico tropical, lo que puede representar una amenaza a la producción energética del Golfo de México. La Niña provoca un calentamiento anormal de las aguas en el océano Pacífico ecuatorial, que puede confundir los patrones climáticos en la región de Asia-Pacífico.



Climate Prediction Center/NCEP/NWS
Figura 1.14. Circulación atmosférica durante “El Niño”. (Fuente: NOAA)

1.5. CAMBIO CLIMATICO

En la actualidad resulta más evidente que las emisiones de gases de invernadero generadas por el hombre están afectando el clima del planeta. Durante el último siglo se registraron incrementos en la temperatura global que no son explicables en su totalidad por causas naturales. Los escenarios proyectados sugieren aumentos en la temperatura mínima de 2 °C para México, lo cual podría tener impactos en la disponibilidad de agua, el aumento de la evapotranspiración y disminuir escurrimientos e infiltraciones. Por otro lado, el cambio climático podría significar aumentos en la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales por el Caribe y el Golfo de México.

Uno de los sectores de gran importancia para el país que se considera vulnerable ante el cambio climático es el energético. La producción y demanda de energía requerirán de modificaciones en su estructura si se considera que gran parte de su funcionamiento (ejem. Producción hidroeléctrica, precios de verano para la energía en el norte del país, seguridad de las plataformas petroleras) depende de variables climáticas como la precipitación, la temperatura y el viento. La infraestructura de las plataformas petroleras presenta un riesgo mayor debido al cambio climático.

Aunque la temporada de huracanes del 2005 no está completamente vinculada con el cambio climático, la gran actividad ciclónica ha traído consigo que los productores que extraen petróleo del Caribe y del Golfo de México consideren actividades adicionales sobre la seguridad de sus plataformas. No sólo los vientos de los huracanes constituyen una amenaza para las plataformas petroleras. Las olas que producen obligan con frecuencia a parar las operaciones y evacuar personal de las plataformas con graves pérdidas para la industria de la extracción del petróleo. Si además del aumento en frecuencia e intensidad de los huracanes, se considera que el nivel del mar aumentará bajo cambio climático, el escenario de riesgo para las plataformas petroleras aumentará.

1.5.1. Impacto del cambio climático en la actividad de los ciclones tropicales

Las relaciones entre los ciclones tropicales y el cambio climático son científicas y socialmente complejas con grandes implicaciones económicas, para el año 2005 ocurrieron un gran número de ciclones tropicales (27) y de huracanes (14). La naturaleza en la temporada de huracanes en el Atlántico norte proporciona una vasta información para considerar las interacciones de causas y efectos de este tipo de fenómenos meteorológicos en el marco del cambio climático.

Los cambios del clima también están cambiando las características de ciclones tropicales, incluyendo sus efectos en precipitación, nivel del mar y marea de tormenta; las tendencias positivas de la frecuencia de ciclones tropicales en combinación con el aumento de la vulnerabilidad de la sociedad son causa de preocupación.

En un mundo más caliente y húmedo, un incremento en la actividad de huracanes hace más probable que la intensidad de los vientos máximos aumente en un

10% para un ambiente con doblamiento de CO₂. Asimismo, estudios de modelación climática indican que tanto la velocidad del viento como la precipitación tenderán a aumentar (Caetano dos Santos, Ernesto, 2006).

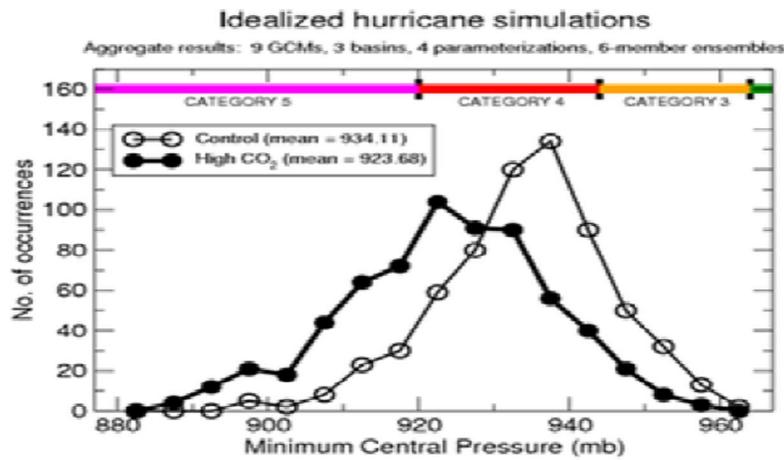


Figura 1.15. Cambio de categoría de huracanes bajo cambio climático. (Fuente: UCAR)

Las observaciones, el modelado y la teoría es un indicador del problema que estamos probablemente ya experimentando en cuanto a ciclones tropicales intensos como resultado de calentamiento global. Con un nivel del mar de más alto debido océanos más cálidos, la erosión de playas y manglares debido a tormentas de marea asociadas a ciclones tropicales, pueden causar impactos más severos (Fig. 1.15.).

2.0. IMPACTOS DE EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN ZONAS PETROLERAS

Existen en todo el mundo problemas con el impacto de los fenómenos meteorológicos similares a las que observa la paraestatal PEMEX en sus instalaciones, se reconoce que estos eventos atmosféricos pueden causar daños significativos en las instalaciones de costa y mar adentro, como un ejemplo el desplazamiento de una plataforma de perforación al grado de que entre en contacto con una plataforma fija.

En este capítulo se presentan un análisis diagnóstico de dos eventos en particular, el huracán Dean y el Norte asociado al Frente Frió no. 4.

2.1. HURACAN DEAN

Dean en su origen presento una trayectoria a través del Caribe (Fig. 2.1), pasando muy cerca de Jamaica, se movió en sentido este-oeste a través del mar Caribe después de haber pasado sobre las Antillas Menores y tocando tierra en el este de las costas de la Península de Yucatán como un huracán de categoría 5. Dean es el primer huracán del Atlántico desde Andrew en 1992 que tuvo una categoría 5.

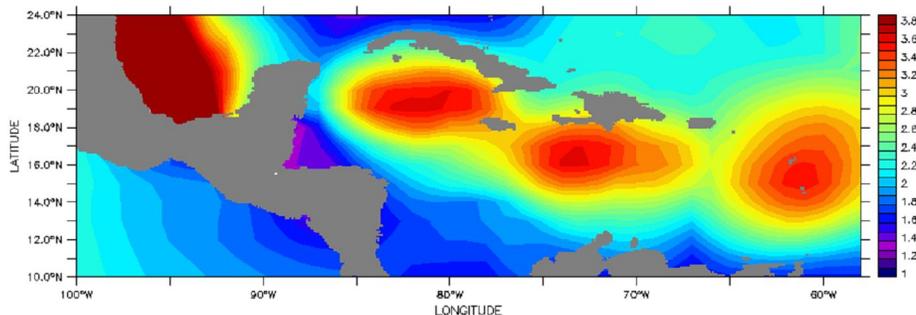


Figura 2.1. Altura de olas. (Fuente: oceanos.com)

Con el paso de este evento, Petróleos Mexicanos retiró 18000 trabajadores de 407 pozos en el litoral de la sonda de Campeche, que abarca los estados de Tabasco y Campeche por la presencia del huracán Dean. Con categoría 2, arrastró vientos de hasta 44.5 [m/s] cuando tocó tierra el miércoles por la mañana cerca de la ciudad de Tecolutla, en la costa del estado de Veracruz, unos 50 kilómetros al este de Poza Rica, como detalló el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos. Se tomó medidas protectivas en las plataformas que están tierra adentro, al norte de la ciudad de Tampico. Esas instalaciones representan un porcentaje mínimo de la producción de la empresa.

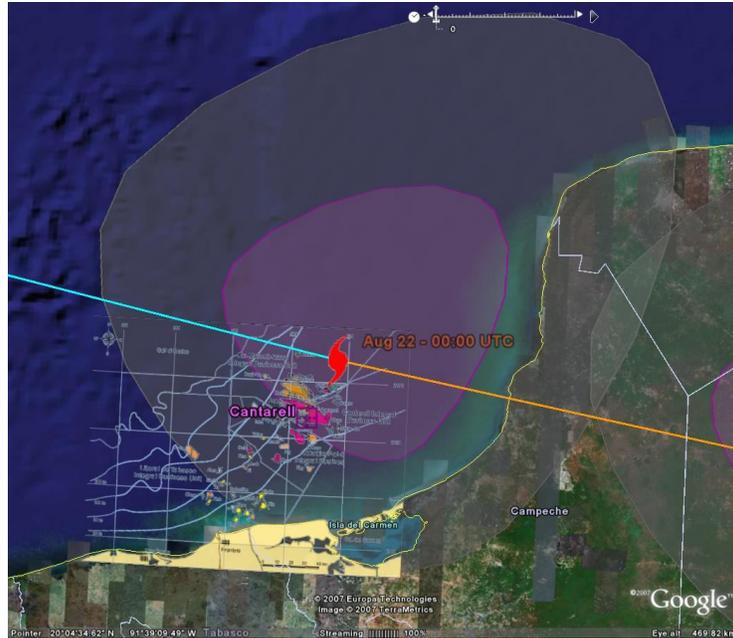


Figura 2.2. Complejo Cantarell afectado al paso del huracán Dean. (Fuente: The Oil Drum)

El cierre de 32 pozos ubicados en la costa de Veracruz implicó una suspensión adicional en la producción de 18.000 barriles de crudo y 3.681 millones de metros cúbicos de gas natural al día, se presentaron daños mínimos en las plataformas de tierra en la ciudad costera de Ciudad del Carmen, por la inundación del 70% de la ciudad. Los tres principales puertos de exportación de crudo de PEMEX en la península de Yucatán (Fig. 2.2.) fueron cerrados. La paraestatal suspendió la extracción de 2,6 millones de barriles diarios de petróleo y 74.586 millones de metros cúbicos de gas natural en la región.

La paralización de las actividades petroleras causó a la estatal una pérdida acumulada por 1.500 millones de dólares, correspondientes al petróleo que alcanzaría 160 millones de dólares diarios y por gas natural, 190 millones (El Universal, martes 21 de agosto del 2007). La llamada sonda de Campeche aporta el 83 % de la extracción nacional de petróleo.

2.2.1. Análisis diagnóstico

Dean se originó de una onda tropical que cruzó la costa occidental del África el 11 de agosto del 2007. La onda se asoció con una superficie baja desplazándose a un centro de circulación elongada durante un par de días. (Figura 2.3.)

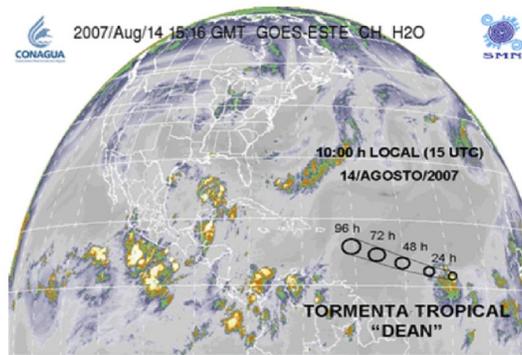


Figura 2.3. Diagrama de desarrollo de la tormenta tropical “Dean” en el Atlántico Central. (Fuente: CONAGUA)

Alrededor de las 0600 UTC del 13 de agosto, la circulación se hizo más definida considerando una depresión tropical a unos 189 [km] al oeste-suroeste de Praia en las islas de Cabo Verde. La trayectoria del ciclón tropical se da en la figura. 2.4, el historial del viento y presión se muestra en las figuras. 2.5. respectivamente. Las mejores posiciones de trayectoria y las intensidades se muestran en la Tabla A.1 (sección anexo).

La depresión inicialmente se trasladó hacia el oeste, tomó 30 horas para llegar a la intensidad de una tormenta, lo que ocurrió a las 1200 UTC del 14 de agosto, cuando el sistema se ubicaba a unos 675 [km] al este de Barbados.

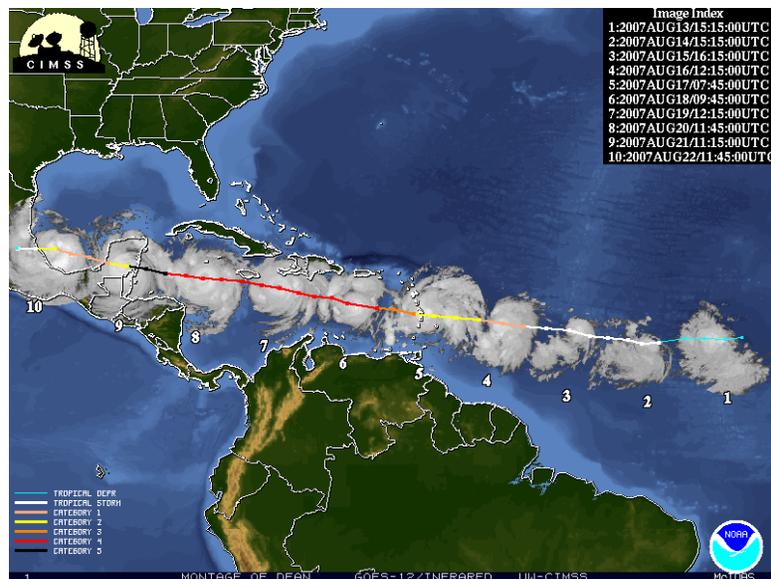


Figura 2.4. Trayectoria del huracán Dean. (Fuente: NOAA)

Poco después, las imágenes infrarrojas del satélite comenzaron a mostrar el ojo, Dean se convirtió en un huracán en las primeras horas del 16 de agosto cerca de 259 [km] al este de Barbados. Alcanzó una intensidad de 41.15 [m/s] en 1200 UTC en ese día, pero la pared del ojo desapareció y el fortalecimiento en la tendencia se detuvo temporalmente.

Dean entró en el Mar Caribe el 17 de agosto, su centro pasó entre Martinique y St. Lucia. La pared del ojo norte, fue acompañado de vientos sostenidos de cerca de 43.72 [m/s], Intensificándose con una gran rapidez en el este del mar Caribe, sus vientos aumentaron desde los 41.15 hasta los 74.6 [m/s] (de categoría 1 aumento a la categoría 5 en la escala de huracanes Saffir-Simpson) en 24 horas el 18 de agosto. A las 12.00 UTC de ese día, tuvo una presión central mínima de 923 [hPa] (L. Franklin, James, 2008). (Fig. 2.7)

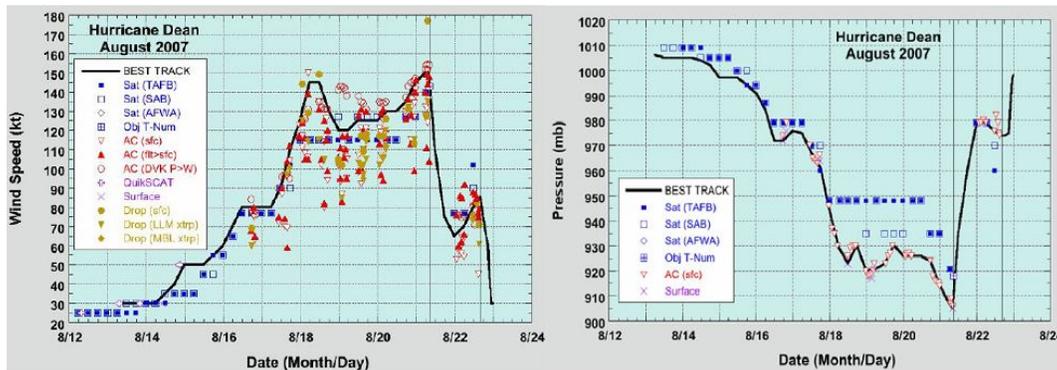


Figura 2.5. Observaciones del viento y la trayectoria de velocidad del viento y de la presión y la curva central mínima del huracán Dean. (Fuente: NOAA)

Durante este período de rápida intensificación, el movimiento de avance se redujo a 7.71 [m/s] aproximadamente, tuvo una constante en todo el Caribe; la presión describió el mismo comportamiento. El centro de Dean continuó hacia el oeste-noroeste en dirección a Jamaica. El 20 de agosto se alejó de Jamaica hacia las aguas del noroeste del Caribe. Comenzó a intensificarse cuando se acercaba a la Península de Yucatán. Alcanzando la categoría 5, cerca de las 0000 UTC del 21 de agosto, tocó tierra cerca del pueblo de Majahual en la región turística de la Costa Maya de Yucatán, cerca de 0830 UTC de ese día, con una presión mínima central de 905 [hPa] y vientos máximos sostenidos de 77.2 [m/s].

A medida que avanzaba a través de la Península de Yucatán, emergiendo en la Bahía de Campeche en torno a 1900 UTC del 21 de agosto. Aunque mantenía la fuerza de un huracán a lo largo de su paso de 10 horas en tierra, su estructura interna convectiva central se fue interrumpiendo en gran medida. El radio de ojo del huracán se había ampliado a 30 [km], y sólo pudo recuperar una pequeña fracción de su antigua fuerza (L. Franklin, James, 2008).

El sistema de alta presión ubicado a lo largo de la costa norte del Golfo de México mantuvo a Dean en la trayectoria oeste-noroeste hasta las 12:00 UTC del 22 de agosto. Dean tocó tierra a las 1630 UTC de ese día cerca de la ciudad de Tecolutla, México, cerca a 50 [km] del noroeste de Veracruz, entro como un huracán de categoría 2 con vientos de 43.72 [m/s]. Debilitándose rápidamente, convirtiéndose en una depresión a las 0000 UTC del 23 de agosto, y se disipó al interaccionar con el relieve de la Sierra Madre Oriental.

2.3. NORTE NO. 4

Desde las 7:00 horas del día 23 de octubre de 2007, la plataforma de perforación autoelevable Usumacinta (tipo MAT-Cantilever), que se preparaba para perforar un pozo en la plataforma de producción (Sea Pony) KAB-101, enfrentó un evento meteorológico severo el Frente Frío no. 4, es una franja de mal tiempo que ocurre cuando una masa de aire frío se acerca a una masa de aire caliente.

El aire frío, siendo más denso, genera una "cuña" y se mete por debajo del aire cálido y menos denso, son generalmente guiados por corrientes de aire y viajan de oeste a este. Causo tormentas, chubascos, y vientos fuertes, la plataforma Usumacinta se movió vertical y horizontalmente. Una cubierta auxiliar, colocada debajo del cantilever de la plataforma, golpeó al árbol de válvulas del pozo 121 desprendiéndolo del mismo, lo que ocasionó la primera fuga de aceite y gas.

Para controlar la fuga y con el fin de evitar un peligro mayor al resto del personal, los trabajadores de la plataforma en una maniobra altamente riesgosa, bajaron a la plataforma de producción KAB-101 y activaron el cierre de las válvulas de seguridad sub-superficiales (válvulas de tormenta) de los pozos 121 y 101, con la fuga de los hidrocarburos y con el previo conocimiento de que en los pozos se tiene la presencia de ácido sulfhídrico, se decidió evacuar totalmente la plataforma, el personal subió a los botes salvavidas; sin embargo, el desorden y el pánico prevalecieron y se abrieron las escotillas, lo que permitió la entrada de agua afectando la estabilidad de los botes. (Fig. 2.6.)

El mal tiempo del Norte, la entrada de agua a los botes, así como el desorden y el pánico dificultaron el rescate y como consecuencia fallecieron 20 trabajadores de la plataforma y 2 tripulantes del remolcador Morrison Tide, aunado a los daños importantes a las instalaciones.



Figura 2.6. Desmantelamiento del piso de perforación y cantilever. (Fuente: Informe Battelle, PEMEX)

Los factores críticos presentes en este evento manifiestan que no se tenía conciencia de que un evento meteorológico como el que afrontó la plataforma Usumacinta pudiera ocasionar que ésta se desplazara en un grado importante con respecto a su posición original. No se tenían considerados los riesgos a los que se

encontraba la plataforma “MAT- Cantilever” especialmente en situaciones como la que desarrollo el Norte.

Se disponía, con muchas horas de anticipación, de datos sobre la fuerza y peligrosidad del Norte que se aproximaba a la plataforma Usumacinta. Sin embargo, la calidad de los pronósticos fue errónea para la puesta en marcha de acciones preventivas. Los boletines meteorológicos carecieron de la precisión necesaria para una buena estimación del riesgo que en este caso fue equivalente al de un huracán de clase 1, y aún cuando se tienen planes y procedimientos para enfrentar huracanes, no se cuenta con sistemas equivalentes para el caso de otros eventos meteorológicos severos, tales como los Nortes (Brian Leis, Brain; Chidester, Richard; Flamberg; Stephanie et al, 2007).

2.3.1. Análisis diagnóstico

La temporada de huracanes en el Atlántico ha sido ampliamente definida entre el 1ro de junio y el 30 de noviembre, período en que surgen el 97% de los sistemas tropicales. La temporada de Frentes Fríos en el Golfo de México, si bien no es tan formalmente definida, típicamente empieza hacia finales de la temporada de huracanes. Los registros históricos sobre tormentas indican que empieza en octubre y generalmente termina a finales de mayo.

De acuerdo con el análisis de superficie del Hydrometeorological Prediction Center (HPC, 2008), el 1 de octubre del año 2007 un sistema de alta presión entró a Estados Unidos por los estados de Oregon y Washington, cuyo centro presentaba un valor máximo de presión reducida al nivel del mar (PRNM) de 1028 [hPa]. Al mismo tiempo, en el Golfo de México se ubicaba un Frente Estacionario que se extendía desde el estado de Florida en E. U. hasta Tamaulipas en México. En el Océano Pacífico se aprecia la tormenta tropical Kiko que, de acuerdo con el National Hurricane Center (NHC) se ubica a más de 278 [km] de Manzanillo, Colima, con un desplazamiento y una continua debilitación en dirección oeste-noroeste (NHC, 2008).

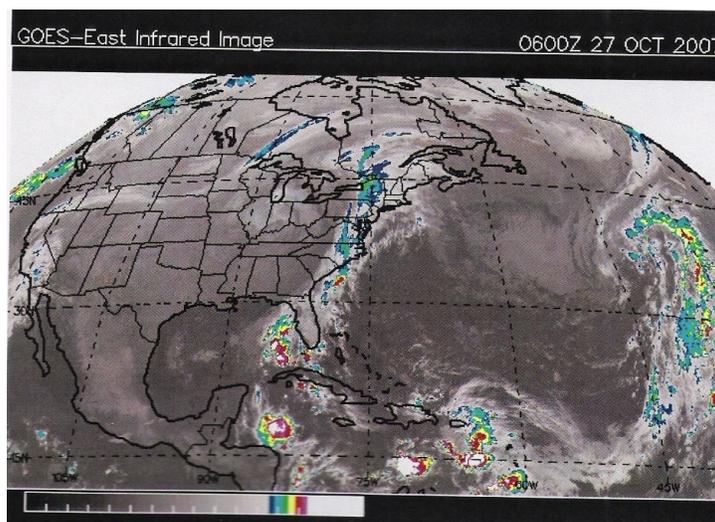


Figura 2.7. Imagen Infrarroja del satélite GOES del día 27 de octubre del 2007. (Fuente: NASA)

Posteriormente, el sistema se desplazó hacia el sureste y la masa de aire frío asociada se extendió sobre una área que abarca el oeste de E.U., el norte de México y el Golfo de México imponiendo el movimiento descendente de aire en la atmósfera, descenso de temperatura en superficie y convección a lo largo de la línea frontal. El paso del sistema de alta presión a través del Golfo de México provocó vientos intensos y fuerte oleaje que afectaron las zonas costeras mexicanas. La humedad en el Caribe se desplazó hacia el oeste e interactuó con el Frente Frío al atravesar el Golfo de México, ocasionando lluvias intensas en los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas entre los días 22 y 25 de octubre (Fig. 2.7.). La parámetros del fenómeno meteorológico se pueden observar con mayor definición se pueden observar en la Tabla A.2. (sección anexo).

El pronóstico del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) del día 22 de octubre del SMN, indicó que la intensidad de los vientos son de fuertes (17 y 24 [m/s]) a severos (mayores a 33 [m/s]), ahí mismo se indica que del 19 al 25 de octubre se registraron precipitaciones acumuladas de hasta 396 [mm] en Sayula, Chiapas. El día 25 de octubre el Frente Frío se modificó a un Frente Estacionario debido a la interacción con una gran masa de aire tropical ubicada en el Mar Caribe. Posteriormente, el Frente se desplazó hacia el oeste como un Frente Cálido hasta llegar al Istmo de Tehuantepec, donde se convirtió en Estacionario debido a que un nuevo sistema de alta presión llegó al Golfo de México, provocando una nueva intensificación de los vientos con una componente predominante del norte, dirigidos a la costa sur del Golfo de México (López Méndez, J. Valentín, 2009).

El día 29 el Frente Estacionario se extendía desde Florida hasta las costas de Tabasco (Fig. 2.8.) manteniéndose en esa posición por más de 48 horas, generando un flujo de vientos hacia el Istmo que transportó humedad y contribuyó a las precipitaciones registradas en esa región. Los pronósticos del SMN del 28 al 31 de octubre indicaron precipitaciones intensas, categoría máxima en su escala para los pronósticos de precipitación, lo cual significa que las lluvias acumuladas en 24 horas podrían ser mayores a 70 [mm]. Los registros superaron ampliamente la precipitación que estimaban los pronósticos, ya que el informe indica que la precipitación acumulada entre del 26 al 31 de octubre en Ocoatepec, Chiapas alcanzó 962 [mm] (López Méndez, J. Valentín, 2009).

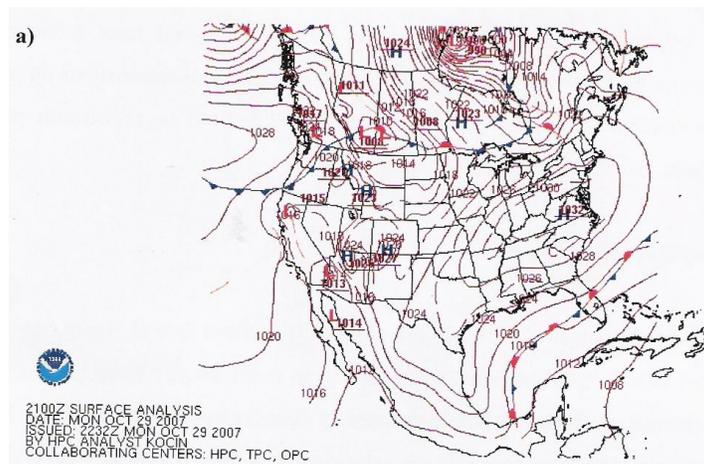


Figura 2.8. Análisis de superficie del día 29 de octubre del 2007. (Fuente: NOAA)

3.0. DATOS Y METODOLOGÍA DEL MODELO ATMOSFÉRICO WRF

En la recopilación de datos obtenidos de los fenómenos atmosféricos anteriormente vistos en esta tesis, se puede concluir que generalmente no existen prácticas referentes a los eventos meteorológicos extremos, por lo tanto, las decisiones tomadas respecto al personal o la plataforma tienden a depender de la experiencia del superintendente y su confianza en los pronósticos disponibles o su interpretación de estos.

Esto como se analizó no siempre resulta productivo y puede representar un gran riesgo tanto en factores humanos, de equipo como económicos, el pronóstico acertado como una precisa gestión de riesgo prevendría catástrofes futuras, el uso de modelos atmosféricos representan la ayuda que se busca para estas problemáticas, en los capítulos siguientes se estudiará y conocerá un modelo atmosférico que se ajuste al planteamiento antes dicho.

3.1. MODELO NUMÉRICO WRF

Un modelo numérico es una representación teórica de un fenómeno natural, típicamente expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento.

En el caso de la atmósfera, el comportamiento está regido por las ecuaciones asociadas a la dinámica de la atmósfera y otros procesos físicos como la interacción entre la materia y radiación, la microfísica de nubes, etc. En general, estas ecuaciones se expresan como ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen la evolución futura de las diferentes variables relevantes en función de los valores de las distintas variables en el presente. El modelo matemático consiste en estas ecuaciones junto con los valores de parámetros y condiciones de frontera (por ejemplo, las características topográficas de la Tierra, la cantidad de energía emitida por el Sol, etc.).

Si conociéramos el estado de la atmósfera en un momento dado, podríamos en principio resolver las ecuaciones de los modelo matemático para determinar los estados futuros de estos (salvo por limitaciones en predictibilidad). Sin embargo, en la práctica las ecuaciones son tan complejas que es imposible hacerlo en forma analítica por lo cual es necesario resolver las ecuaciones en forma aproximada usando métodos numéricos con la ayuda de computadoras. Los programas computacionales que resuelven estas ecuaciones aproximadas son comúnmente conocidos como "modelos numéricos" (Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima).

WRF por sus siglas de Weather Research and Forecast Model es un modelo de mesoescala de última generación, es un sistema de predicción numérica del tiempo, diseñado para servir como herramienta de investigación atmosférica. Cuenta con núcleos dinámicos múltiples, un sistema de asimilación de datos con variación en 3 dimensiones (3DVAR), y un estructurado software que tiene en cuenta el paralelismo computacional y la expansibilidad del sistema. WRF es adecuado para un amplio

espectro de aplicaciones a través de escalas que van desde metros hasta miles de kilómetros. El esfuerzo para desarrollar WRF fue realizado por una asociación colaborativa, principalmente entre el National Center for Atmospheric Research (NCAR), The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL), el Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory (NRL), numerosos paquetes de modelación física, han sido aportados por la comunidad asociada de investigadores que utilizan WRF y se encuentra disponible de manera gratuita para la comunidad científica internacional, para fines académicos.

WRF proporciona un modelo operativo de pronóstico flexible y eficiente computacionalmente, ofreciendo al mismo tiempo modelos de la física atmosférica, numéricos, y la asimilación de los datos aportados por la investigación de la comunidad. WRF se encuentra actualmente en uso operacional por el CNPA, AFWA y otros centros (<http://www.wrf-model.org/index.php>)

3.2. APLICACIONES DEL WRF

El WRF es un modelo de dominio público y está disponible para toda la comunidad gratuitamente. El modelo puede ser usado en un amplio espectro de aplicaciones como:

- Simulaciones Idealizadas
- Aplicaciones Regionales y Globales
- Investigación en Asimilación de Datos
- Investigación en Parametrizaciones
- Pronóstico Meteorológico
- Aplicaciones de Modelos acoplados
- Investigación en el desarrollo del pronóstico del tiempo
- Educación

WRF es un modelo comunitario con soporte centralizado (Fig. 3.1.), es decir, su desarrollo y mejoramiento se realiza en distintos sitios alrededor del mundo. WRF cuenta con un soporte técnico, que permite a los usuarios satisfacer sus dudas sobre cualquier aspecto del programa. La división meteorológica de mesoescala y microescala de NCAR es permanentemente mantenida y apoyada por WRF estas incluyen:

- Marco de Software WRF (WSF)
- WRF Investigación Avanzada (ARW) solucionador de dinámica, incluyendo una o dos vías de anidación y movimiento de grillas
- WRF-DA datos del sistema de asimilación
- Numerosos paquetes de modelación de física, aportados por la comunidad asociada e investigadores que utilizan WRF
- WRF está compilado por medio de openMP al ejecutar WRF.exe genera tipos de archivos de wrfout_d0* y wrfst_d0*

WEATHER RESEARCH & FORECASTING (WRF) MODEL

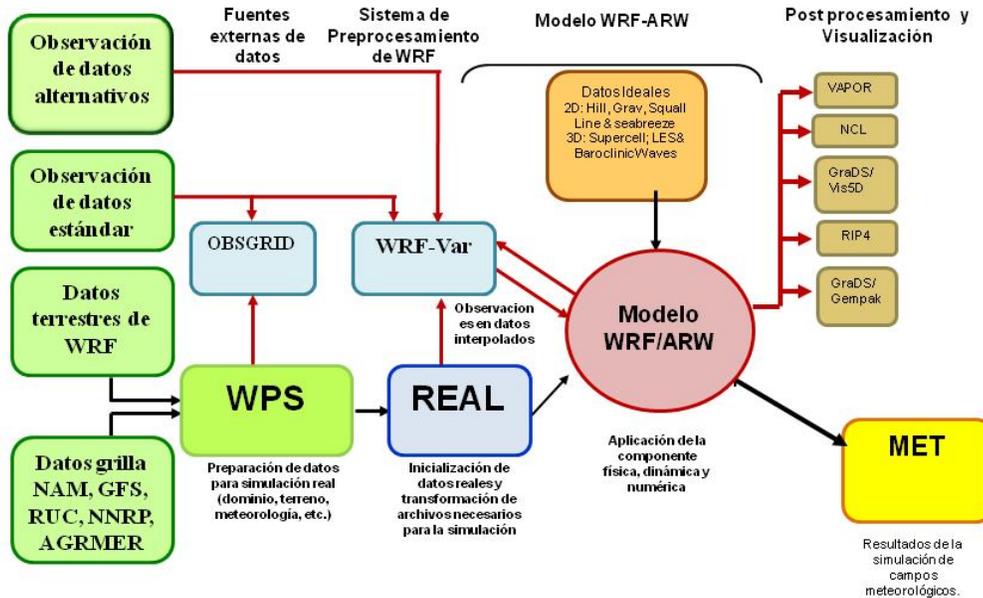


Figura 3.1. Diagrama de flujo del modelo atmosférico WRF. (Fuente: wrf-model.org)

3.3. SISTEMA DE PRE-PROCESO “WPS”

WPS (WRF Preprocessing System), como su nombre lo indica, es la parte de WRF encargada del pre-procesamiento de los datos para ser utilizados por WRF.

Para realizar esto, WPS tiene tres módulos (Geogrid, Ungrib y Metgrid) listados dentro de un archivo llamado “namelist.wps” en el cual se hacen los procesamientos de la definición del dominio, datos atmosféricos, físicos y topográficos (Fig. 3.2.). La función colectiva de estos tres es preparar la entrada al programa "real.exe" para la simulación de los datos reales. Cada uno realiza una etapa de preparación:

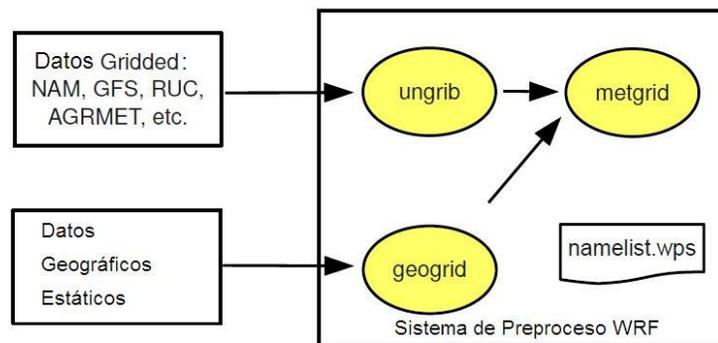


Figura 3.2. Sistema de pre-proceso del modelo atmosférico WRF. (Fuente: ucar.edu)

Geogrid: Este módulo calcula la posición de los puntos de retícula de acuerdo a las especificaciones de resolución, número de puntos, posición del centro, etc provistas por el usuario. Una vez posicionados los puntos de la retícula, interpola los datos de topografía, uso de suelo, tipo de suelo, albedo, cobertura vegetal, máscara tierra-agua y demás datos que en el futuro puedan ser utilizados por el modelo.

Ungrib: Se encarga de tomar archivos GRIB, que son archivos meteorológicos globales, desde otros modelos meteorológicos (como GFS, NCEP's NAM, etc.), necesarios para inicializar y correr el modelo, y traducirlos a un formato más simple para que puedan ser procesados por METGRID. Los archivos meteorológicos pueden ser tomados por el usuario según la resolución espacial y temporal en el que se desee modelar desde los links publicados en la página oficial de WRF.

Metgrid: Este módulo interpola horizontalmente los datos de la atmósfera extraídos por el programa UNGRIB a la retícula definida por el programa GEOGRID. Por ejemplo puede tomar un análisis y un pronóstico global e interpolarlo a la retícula del modelo (Tutorial para el uso del modelo WRF, NCAR-NMM).

3.3.1. Parametrizaciones de los procesos físicos

La capacidad computacional impone un límite sobre la resolución espacial que se puede emplear. Los modelos globales y de mesoescala de la atmósfera emplean típicamente un Δx de cientos de kilómetros. Por otro lado, existen procesos físicos que tienen escalas espaciales bastante más pequeñas pero desarrollan un efecto sobre la circulación a gran escala.

Este es el caso, por ejemplo, de la microfísica de nubes, la cual se encarga de los procesos responsables de la formación de las gotitas de agua y cristales de hielo en las nubes. Debido a que las nubes tienen un efecto importante sobre el clima, estos procesos se deben representar de alguna manera en el modelo de baja resolución. La manera como esto se hace es evidentemente de forma aproximada y los algoritmos encargados de esto se denominan "parametrizaciones", debido a que estas son aproximaciones (Centro de Predicción Numérica del Tiempo y Clima).

Las Parametrizaciones físicas en el modelo WRF están integradas en el archivo "namelist.input" a continuación se muestran detalladamente cada una de estas:

Micro Física. Es la emulación en los modelos de los procesos de nubes y precipitación que eliminan el exceso de humedad atmosférica producido directamente por los campos de viento, temperatura y humedad pronosticados sobre la base de la dinámica. (http://www.meted.ucar.edu/nwp/model_precipandclouds_es/navmenu.php?tab=1&page=2.0.0)

- Kessler. Este esquema (Kessler, 1969), que fue tomado del modelo COMMAS (Wicker y Wilhelmson, 1995), es un esquema simple de nube cálida que incluye el vapor de agua, las nubes y la lluvia. Los procesos microfísicas incluidos son los siguientes: la producción, caída y evaporación de la lluvia, la acreción y

autoconversión de agua de nube, y la producción de agua de nube por condensación.

- Lin et al. Incluye seis clases de hidrometeoros: vapor de agua, agua de nube, lluvia, hielo de nube, nieve y Graupel/granizo. Todos los términos de producción están parametrizados y se incluye ajuste por saturación y la sedimentación de hielo. Se trata de un esquema microfísico relativamente sofisticado en este modelo WRF, siendo más adecuado para llevar a cabo estudios de investigación. (Russ Schumacher, 2006).
- WRF Single-Moment 3-class. Este esquema incluye la sedimentación de hielo y otras parametrizaciones nuevas y mejoradas de la fase sólida respecto del viejo esquema NCEP3. La mayor diferencia con los otros esquemas es el empleo de una relación de diagnóstico para la concentración de hielo que se basa en la masa de hielo contenida en lugar de la temperatura. Se incluyen tres categorías de hidrometeoros: vapor de agua, agua de nube/hielo de nube, y lluvia/nieve. Al igual que ocurre con Dudhia (1989), este es el llamado esquema de hielo simple en el que el agua de nube y el hielo de nube se cuentan como una misma categoría (Hong et al., 2004).
- WRF Single-Moment 5-class. Un esquema ligeramente más sofisticado que WRF Single-Moment 3-class que incluye procesos de fase mixta, y agua súper enfriada (Lim and Hong, 2010).
- ETA microphysics (Esquema Ferrier). La cantidad de nubes se procesa luego para determinar la nubosidad baja, media y alta con el fin de dar una guía de predicción operacional de cobertura nubosa. El postprocesamiento se realiza de manera que sea coherente con la nubosidad "percibida" por el esquema de radiación. El esquema de nubes y radiación considera la nubosidad convectiva y de escala de malla en cada capa del modelo para determinar el efecto radiactivo total de la nubosidad en toda la columna de malla del modelo (Rogers, E., T. Black, B. Ferrier, Y. Lin, D. Parrish y G. DiMego, 2001).
- WRF Single-Moment 6-class. Un esquema con parámetros de hielo, nieve y procesos de Graupel, elegible para simulaciones de alta resolución. La parametrización de partículas de las nubes y las gotas de precipitación se basa principalmente en las obras de Lin et al, y Rutledge & Hobbs (Hong, Song-You & Lim, Jeong-Ock, 2006)
- Goddard microphysics. Un esquema con parámetros de hielo, nieve y procesos de Graupel, elegible para simulaciones de alta resolución. Basadas en la radiación y los procesos de la superficie terrestre hidrológicos (Reisner et al., 1998)

- Thompson et al. Un nuevo esquema que contiene parámetros de hielo, nieve y procesos de Graupel, elegible para simulaciones de alta resolución. La parametrización de microfísica Thompson incluye mejoras al anterior esquema de Reisner et al. (1998), ha sido ampliamente probado con estudios de casos ideales y estudios de casos reales en observaciones de invierno en latitudes medias (Hong, Song-You & Lim, Jeong-Ock, 2006).
- Morrison double-moment scheme. Hielo de Momento Doble, nieve y Graupel para simulaciones de cloud-resolving. El esquema microfísica de doble momento predice las concentraciones número y proporciones de mezcla de cuatro especies de hidrometeoros (gotas, hielo en las nubes, lluvia, nieve). Las parametrizaciones base se han desarrollado para simular la nucleación de hielo homogénea y heterogénea, la activación de las gotas, y el índice espectral de tamaño de las gotas. (H. Morrison, 2004)

Radiación de onda larga. Llamada también radiación termal o infrarroja debido a que su espectro corresponde al rango infrarrojo, es emitido por la Tierra, la atmósfera y las nubes. (Segura Curi, Berlin Aveles, 2002)

Radiación de onda corta. Llamada también radiación solar, es emitida por el sol y su rango en el espectro corresponde al ultravioleta, el visible y el infrarrojo cercano. (Wypych, Sebastian et al, 2003).

Capa Límite Superficial. Es una capa situada por encima de los obstáculos rugosos, donde el flujo está poco afectado por la viscosidad, la estructura de los obstáculos individuales o la fuerza de Coriolis, pero sí por la naturaleza de la superficie. Individuales o la fuerza de Coriolis, pero sí por la naturaleza de la superficie, en esta capa se considera que los flujos turbulentos de cantidad de movimiento, calor y humedad son casi constantes con la altura (Castro, M., González, R. y Portela. A, 2004).

Capa Límite Atmosférica. Es la región de la atmósfera próxima a la superficie en la cual los transportes turbulentos verticales de cantidad de movimiento, calor y humedad, tienen un rol dominante (Numerical schemes for parametrizations, ECMWF).

- Mellor-Yamada-Janjic. Esquema operativo ETA. Pronóstico unidimensional turbulento de energía cinética con mezcla local vertical. Vientos intensos con una fuerte turbulencia, lo que puede producir ráfagas de viento lo suficientemente fuertes para causar daños a la propiedad residencial y comercial (Olson, Joseph B, 2009).
- MRF. Esquema con tratamiento implícito de la capa de arrastre en el marco de no-locales-K en la capa de mezcla. No hay parametrización de la capa límite, el coeficientes de difusividad está en función del número de Richardson (Goering, Melissa, 2004)

- ACM2 PBL. Modelo convectivo asimétrico no local que preserva la consistencia física de la mezcla turbulenta entre el modelo de transporte meteorológico y químico (Robert Gilliam, 2003).
- LES PBL. Un gran conjunto de simulaciones (LES) de la capa límite está disponible en la versión 3. Se han limitado a flujos turbulentos idealizados, en superficies horizontales uniformes o periódicas, superficies heterogéneas donde las condiciones de frontera periódicas pueden ser aplicadas en direcciones horizontales. (Chin-Hoh Moeng, 2006).

Cúmulos. Redistribución del calor y la humedad en el interior de la capa límite, estructura de la capa límite de suma importancia a escalas mayores, ya que desencadenan fenómenos de convección severa (J. T. M. Lenaerts et al., 2009).

- Kain-Fritsch. Convección profunda y superficial de sub-red utilizando un enfoque de flujo de masa con corrientes descendentes y la escala de eliminación tiempo CAPE. El aire se mezcla hacia el interior para diluir las propiedades medias de la corriente ascendente, la flotabilidad negativa se puede generar cuando el aire del medio ambiente se mezcla con la corriente ascendente de aire, incluyendo el agua líquida o hielo. (John S. Kain, 2004)
- Betts-Miller-Janjic. Régimen Operativo ETA. Esquema de columna húmeda al perfil mezclado. Betts y Miller (1986) propuso un ajuste en la convección profunda y superficial. La convección profunda en el esquema Betts-Miller es similar a los sistemas de ajuste, excepto que utiliza una base empírica cuasi-equilibrio en perfiles termodinámicos como estado de referencia en lugar de una adiabática húmeda. (S. S. Vaidya & S. S. Singh, 2000).
- Grell-Devenyi ensemble. Multi-cierre, múltiparámetros, el método de ensamble con 144 de sub-redes. Se utilizan comúnmente en parametrizaciones convectivas, representa un período natural de las incertidumbres. Disminución de la cobertura de área. (Gilliland and Clinton M. Rowe, 2007).
- Grell 3d ensemble cumulus. Esquema de los dominios de mayor resolución que permite el hundimiento de las columnas vecinas (WRF physics options, Jimmy Dudhia)
- Old Kain-Fritsch. Esquema de convección profunda utilizando un enfoque de flujo de masa con las corrientes descendentes y la escala de tiempo CAPE. El régimen de KF se deriva de la CPS Fritsch-Chappell. Kain y Fritsch (1990) modificó el modelo corriente de aire ascendente en el sistema y luego se introdujo numerosos cambios, de modo que con el tiempo se convirtió en un régimen muy diferente de Fritsch-Chappell. El régimen de KF es una parametrización de flujo de masa. Se utiliza el método de Lagrange, incluyendo la dinámica de impulso vertical (Donner, 1993), para estimar si existe inestabilidad y, en caso afirmativo, cuáles son las propiedades de las nubes

convectivas. En aras de esta discusión, es conveniente para compartimentar el régimen de KF en tres partes: la función de disparo convectivo, la formulación de flujo de masa, y los supuestos de cierre. (John S. Kain, 2004).

Efectos de nubes. Las nubes influyen en propiedades radiactivas tales como el albedo a longitud de onda corta, la emisión infrarroja y la absorción. Estas propiedades están bien correlacionadas con la distribución de tamaños de las gotas y con el contenido de agua líquida que tenga la nube (Paltridge, 1974).

Cubierta de nieve. Nubes diagnosticadas por el modelo en diferentes capas, lo cual afecta la cantidad de radiación que alcanza la superficie del modelo y el perfil vertical de las tendencias de temperatura que resultan de las interacciones entre nubes y radiación. (Bertel Vehvilainen, 1990)

Flujo de humedad y calor en superficie. Es una relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua que contiene un volumen dado de aire y la que podría contener si el aire estuviera saturado. (Hu H., 2000)

Número de capas subsuperficiales. Cantidad de capas en las regiones subsuperficiales de la atmósfera donde existen flujos turbulentos. (Esa-Matti Tastula, 2004)

3.4. INICIALIZACIÓN DEL MODELO WRF

El modelo WRF puede simular tanto casos reales (utilizando datos reales) como ideales (utilizando una inicialización ideal). Las simulaciones ideales típicamente fabrican una condición inicial para el modelo WRF a partir de modelos 1-D o 2-D y asumen una orografía simplificada. Los casos reales, en cambio, requieren pasar primero por el sistema de pre-proceso (WPS).

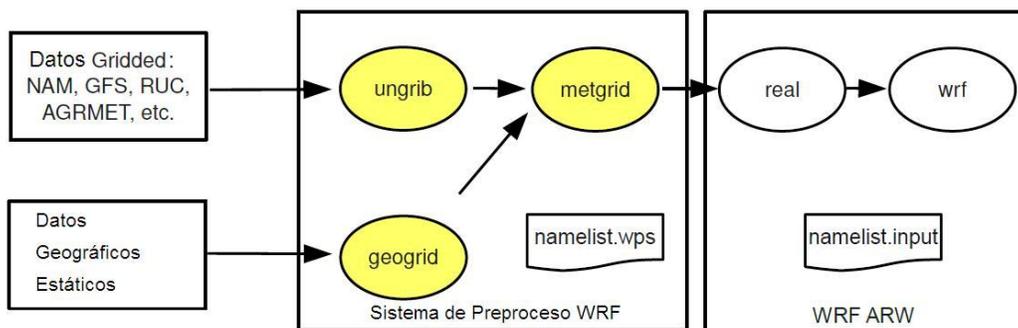


Figura 3.8. Diagrama de flujo del modelo atmosférico WRF. (Fuente: ucar.edu)

3.4.1. Módulo real.exe

Se realiza la inicialización de los casos en los datos reales, el modulo real.exe interpola verticalmente los datos a la coordenada del modelo y construye las condiciones iniciales y de frontera. Real.exe usará como entrada los programas que construimos durante el reprocesamiento, al realizar la corrida se deben obtener al menos dos archivos de salida (Fig. 3.8.).

3.4.2. Módulo wrf.exe

En esta parte se realiza la integración del modelo es decir se incorporan numéricamente las ecuaciones del modelo, se genera la simulación numérica, las salidas numéricas se obtienen en formato NETCDF. Si la corrida es exitosa, se debe generar un archivo wrfout_d01. En esta sección es donde se ve concluida la corrida del modelo a utilizar, para visualizar el archivo de salida obtenido es necesario utilizar un software adicional, existen disponibles varios pero fue utilizado en este estudio el software GRADS para la visualización de los datos de salida. (Fig. 3.9.)

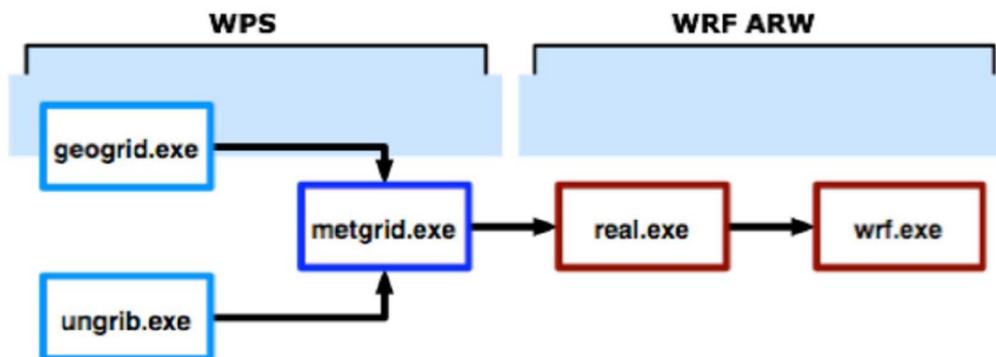


Figura 3.9. Proceso numérico del modelo atmosférico WRF. (Fuente: ucar.edu)

3.4.3. WRF Domain Wizard

Una alternativa del pre-procesamiento es utilizar la aplicación Domain Wizard que es una interface gráfica para el sistema de WPS, permite:

- Definir y localizar fácilmente el dominio, seleccionando una región del planeta y eligiendo la proyección.
- Definir dominios anidados.
- Escribir información en los namelist: namelist.wps y namelist.input.
- Correr los programas del WPS (geogrid, ungrib and metgrid).
- Visualizar los archivos de salida NetCDF.

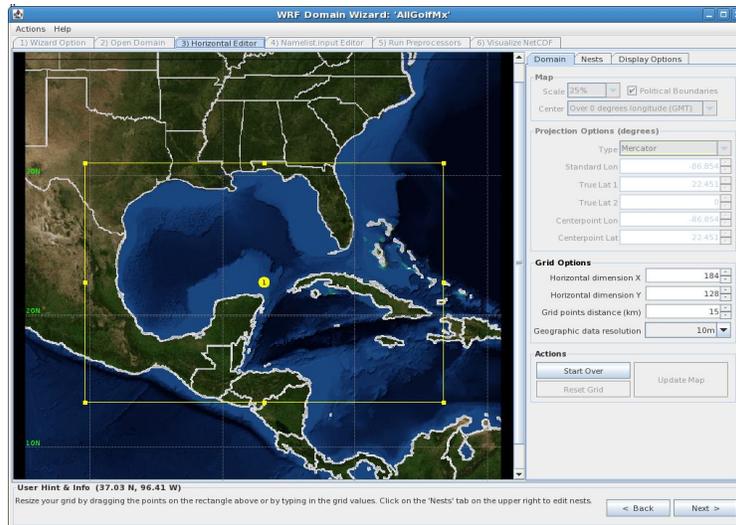


Figura 3.10. Esta Interface fue utilizada para generar las simulaciones de este estudio.

3.5. SISTEMA DE POST-PROCESO DEL WRF

Existe un gran número de herramientas de visualización disponibles para los diversos modelos atmosféricos, estas permiten en forma visual observar el proceso realizado por los modelos y tener un mejor detalle de la corrida, entre estas herramientas se encuentra Grid Analysis and Display System (por sus siglas en inglés GRADS) la cual es uno de las más ocupada por la comunidad científica.

La aplicación GRADS es una herramienta interactiva utilizada para la manipulación y visualización de datos meteorológicos. Esta aplicación es capaz de procesar datos en formato GRIB, NetCDF y HDF-SDS. Gracias a su fácil manejo GRADS es utilizado alrededor del mundo para graficar las salidas de modelos de predicción del tiempo como el MM5, WRF, RAMS, ETA, etc. Al utilizar el programa GRADS para ver las salidas del modelo, existe un paquete (ARWpost) que lee los archivos de salida del WRF y crea salidas compatibles con el formato de GRADS (formato binario).

4.0. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS EVENTOS

El propósito fundamental de este capítulo es conocer la problemática que se presentan de los fenómenos atmosféricos tales como huracanes y Nortes que afectan a la infraestructura petrolera del país; estableciendo una relación entre los factores atmosféricos, tales como: velocidad del viento, presión y temperatura.

Los fenómenos naturales extremos pueden tomar en desventaja a la industria por diferentes motivos y representa pérdidas millonarias al sector energético en este caso petrolero, teniendo las herramientas de modelos numéricos atmosféricos en este caso del WRF, se puede tener una anticipación de los riesgos y mejorar la capacidad para enfrentarlos. Este objetivo debe tener la máxima prioridad para la protección de la vida humana, de las instalaciones y de los ecosistemas. Este es una meta que requiere de un programa detallado de implementación con metas intermedias específicas y medibles. Este cambio debe abarcar no solo a la industria petrolera sino a todas las empresas prestadoras de servicios en otras ramas.

En esta tesis se ocupara el “método de ensamble”, la cual 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 o cualquier combinación de éstas. La principal ventaja de los ensambles 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 (Caracas Uribe, Arturo, 2005).

4.1. SIMULACIÓN DEL HURACAN DEAN

En este capítulo se analizará la habilidad del modelo para pronosticar la trayectoria del huracán en estudio. Se presentó un ensamble de 6 simulaciones para Dean con diferentes condiciones iniciales en la física del modelo y con el esquema de asimilación de datos.

Un modelo de pronóstico numérico del tiempo requiere de condiciones iniciales y de frontera lateral para realizar simulaciones o predicciones a 3, 6, 12,... 120 horas, etc. En el presente trabajo se utilizaron datos de los análisis globales de NARR, para generar la condición inicial del modelo (<http://dss.ucar.edu/pub/narr/>).

Las variables usadas en el WRF son:

Componente zonal y meridional (“u” y “v”) del viento.

Temperatura del aire.

Presión reducida a nivel del mar (SLP).

En la tabla 4.0, se muestran las opciones físicas y esquemas de asimilación de cada uno de los miembros individuales.

| Experimento | Microfísica | Parametrización de cúmulos | Esq. de capa límite | Ensamble multi-física |
|-------------|---|-------------------------------|---------------------------------|---|
| 1 | WRF Single-Moment (WSM) 3-class simple ice scheme | Kain-Fritsch (new Eta) scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | La ecuación de Kain Fritsch es una parametrización de flujo de masa, la inestabilidad del crecimiento de nubes y en sus propiedades. |
| 2 | WRF Single-Moment (WSM) 3-class simple ice scheme | Betts-Miller-Janjic scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | Betts Millar Janjic propone un ajuste en la convección profunda y superficial. Productiva en la simulación de predicción de ciclones tropicales y para simulaciones orográficas. |
| 3 | WRF Single-Moment (WSM) 3-class simple ice scheme | Grell-Devenyi ensemble scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | Grell Devenyi crea una prevención en el conjunto de precipitación cuantitativo. |
| 4 | WRF Single-Moment (WSM) 5-class scheme. | Kain-Fritsch (new Eta) scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | Monin Obukhov proporciona una alta resolución en las predicciones medias, las varianzas, las estimaciones de la energía cinética turbulenta y la variación de la temperatura, velocidad y el espectro de temperaturas |
| 5 | Ferrier scheme: | Kain-Fritsch (new Eta) scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | Ferrier crea una administración en la microfísica de nubes, que prevé diversas formas de condensado en forma de agua en la nube, pequeños cristales de hielo, lluvia, hielo y precipitaciones |
| 6 | WSM 6-class graupel scheme: | Kain-Fritsch (new Eta) scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | WSM 6 crea un escenario de una tormenta idealizada y eventos en fuertes torrenciales, el total de precipitaciones en la superficie es significativamente influenciado por la complejidad en la microfísica |

Tabla 4.0. Método de ensamble “caso Dean”.

Se configuró un solo dominio de 15 kilómetros de resolución horizontal, una resolución geográfica de 10 minutos, con 184 puntos de malla en “x” por 128 puntos de malla en “y”, centrado en latitud 22,54° N y longitud 86,85° W. La integración se llevó a cabo con un paso de tiempo de 3 horas para cinco días de pronóstico, que comprende del 19 (00 “Z”) al 24 (00 “Z”) de agosto. Los 29 niveles de presión se interpolaron a 27 coordenadas verticales sigma. Se consideró este periodo para ver el desempeño del

ensamble en pronosticar la intensificación del huracán, así como su disipación sobre la región noroeste del país el día 24 de agosto.

4.1.1. Modelación de la física

Simulación no. 1. Se realizó siguiendo la especificación detallada en la tabla 4.0. Se utilizó una parametrización “control”, es decir que no hubo cambio en lo que el modelo presenta, se puede creer que es la más conveniente pero no siempre es así. (Fig. 4.0.)

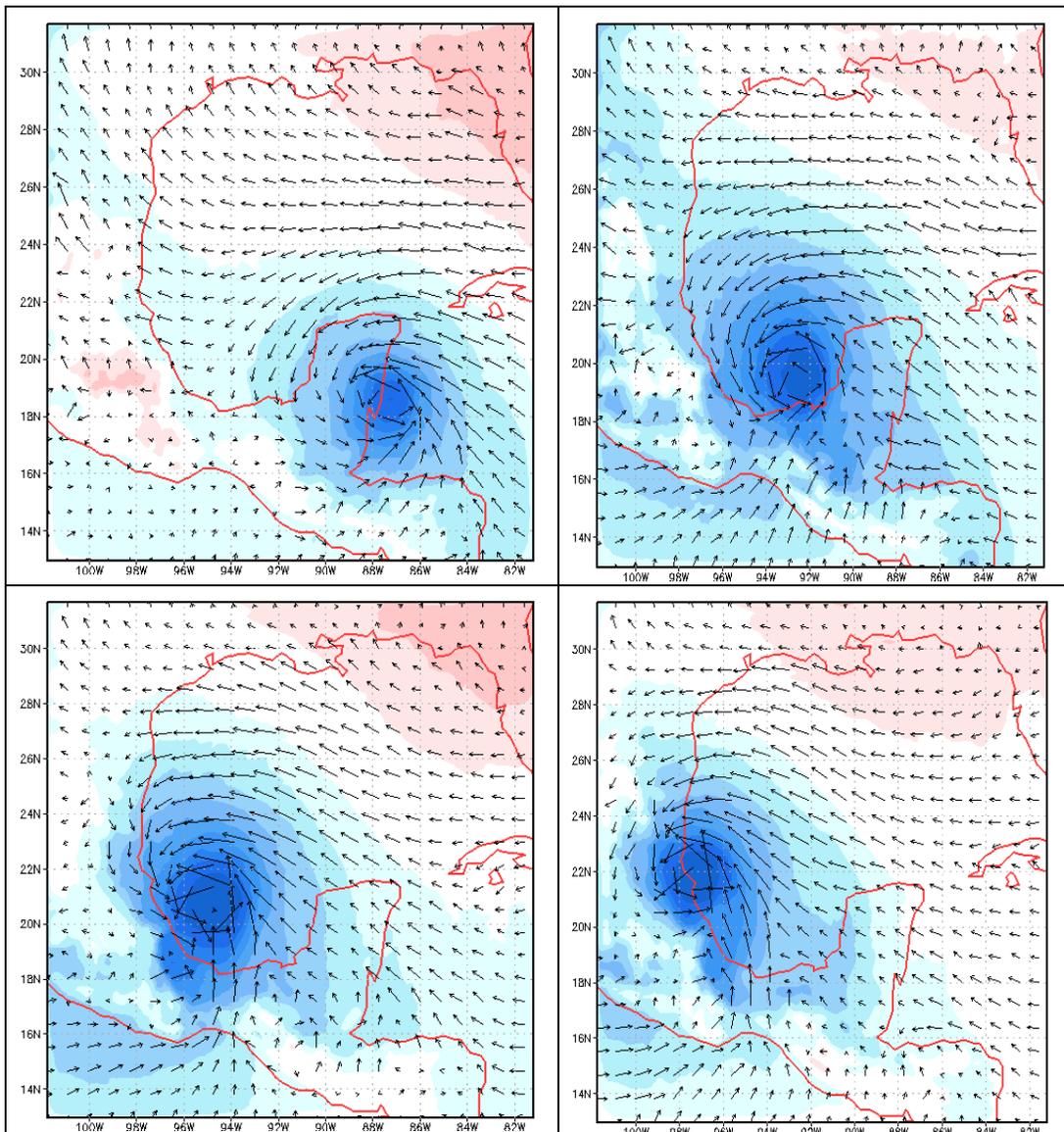
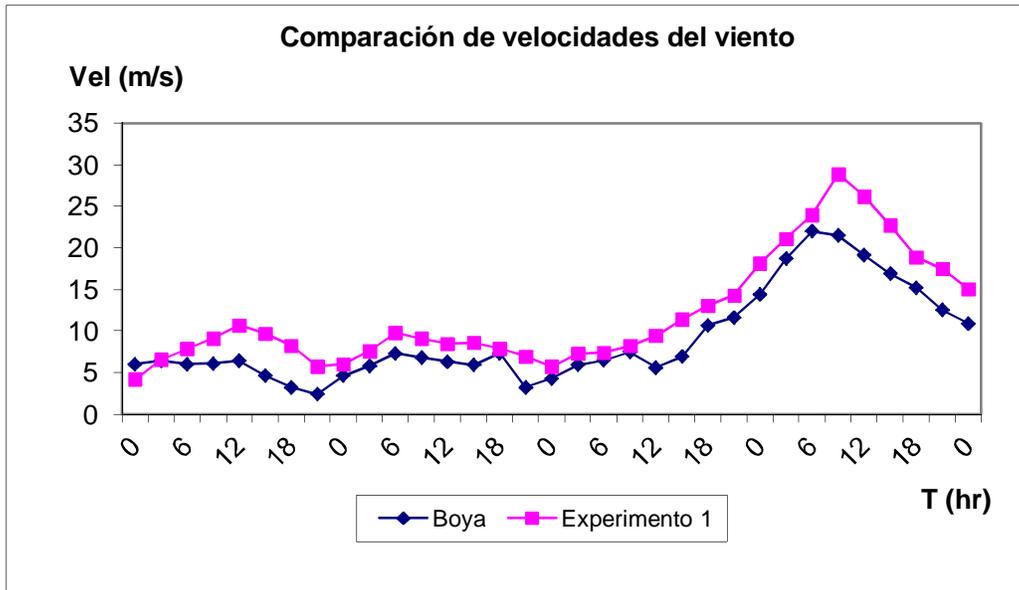


Figura 4.0. Simulación del huracán Dean Experimento 1.

Referente a la figura antes mostrada, se observa la trayectoria simulada por el proceso de ecuaciones mencionadas anteriormente. En el cuadro No. 1 el acercamiento

de “Dean” al continente, estando a pocos kilómetros de la Península de Yucatán, el color azul intenso representa las condiciones de una presión mínima, los vectores representa la máxima velocidad del viento, los siguientes recuadros muestran el avance que tuvo por el Golfo de México hasta su desintegración en el interior de la República Mexicana.



Gráfica 4.0. Datos de Velocidad vs Tiempo.

En la gráfica 4.0. se presenta una comparación de las simulaciones realizadas con los datos presentados por la boya “Station 42906 Petrolia” perteneciente a la NOAA (Fig. 4-A), presenta una localización de 19.633N 92.483W dentro del Golfo de México, situada aproximadamente a 210 [km] de las costas de Ciudad del Carmen, estos instrumentos recogen datos meteorológicos y oceánicos por todo el mundo, es de suma importancia mencionar que el error en medición que presentan las boyas son menores que los de los buques.

De la boya 42906 se recopiló una base de datos referente a presiones y velocidades de viento, el cual se comparó con los datos dados por el modelo WRF, tomando en cuenta la localización de esta, es decir, se realizó una simulación tomando en cuenta las coordenadas 19.63N 92.48W para cada tres horas del día 19 de agosto del 2007 a las cero horas hasta finalizar el 23 de agosto del mismo año a la misma hora. Al obtener estos valores y graficarlos, se puede tener una certeza de la idealización que presentó el modelo, hay que recordar que siempre existirá una brecha de error y nunca podrá presentarse igual a lo que sucede en un evento real, teniendo estas consideraciones se presenta la gráfica dependiente del experimento realizado en el momento.

Al observar la gráfica podemos notar que la modelación realizada por el WRF tuvo un ajuste exitoso, en cuestión vectorial del viento y la parametrización realizada se comprueba que este ensamble representa un ideal para este tipo de casos.

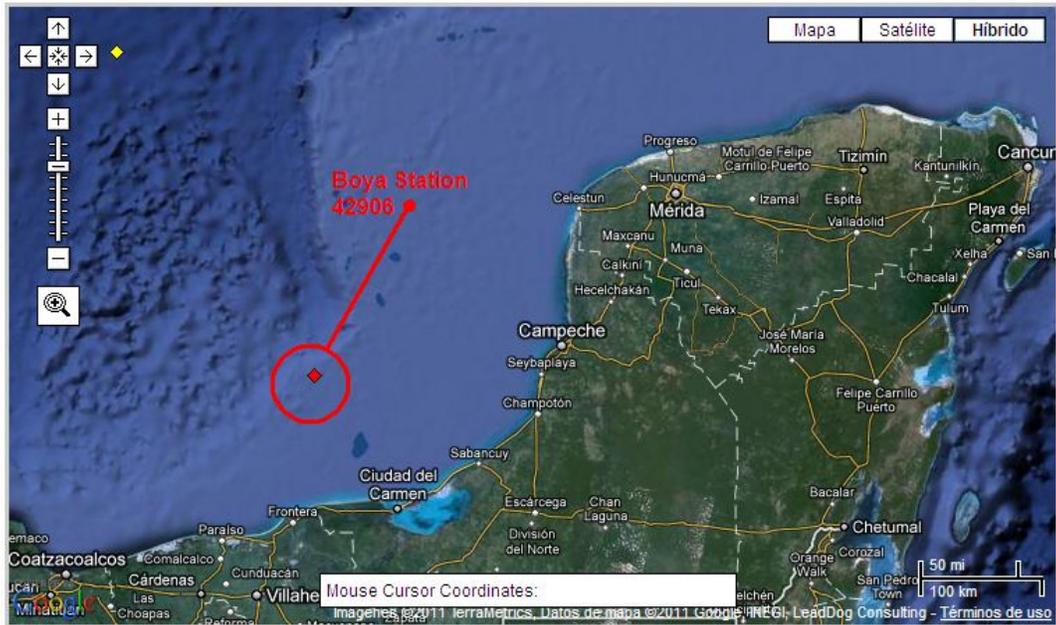
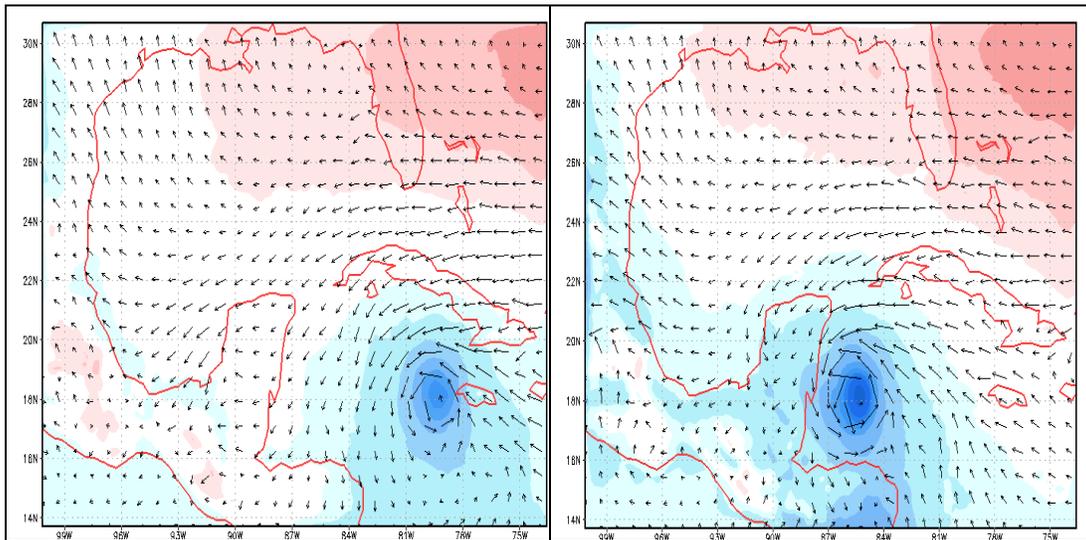


Figura 4-A. Localización Boya 42906. (Fuente: NOAA)

Simulación no. 2. Se utilizó la configuración “2” de la tabla 4.0. la cual se basó principalmente en la parametrización de las ecuaciones de Cúmulos, que redistribuyen el calor y la humedad en el interior de la capa límite, tal como se mencionó en el capítulo 3 de esta tesis. (Fig. 4.1.)



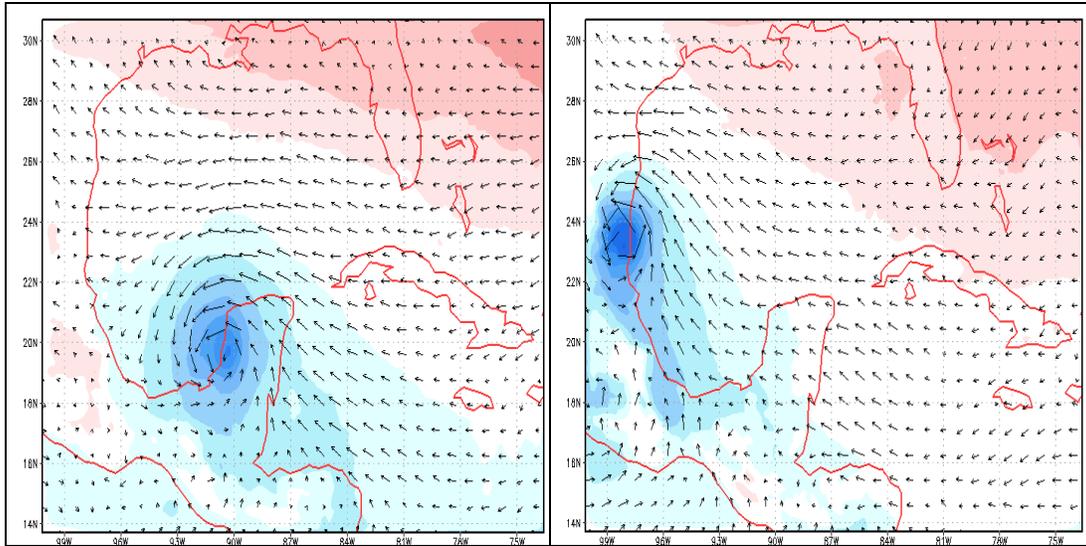
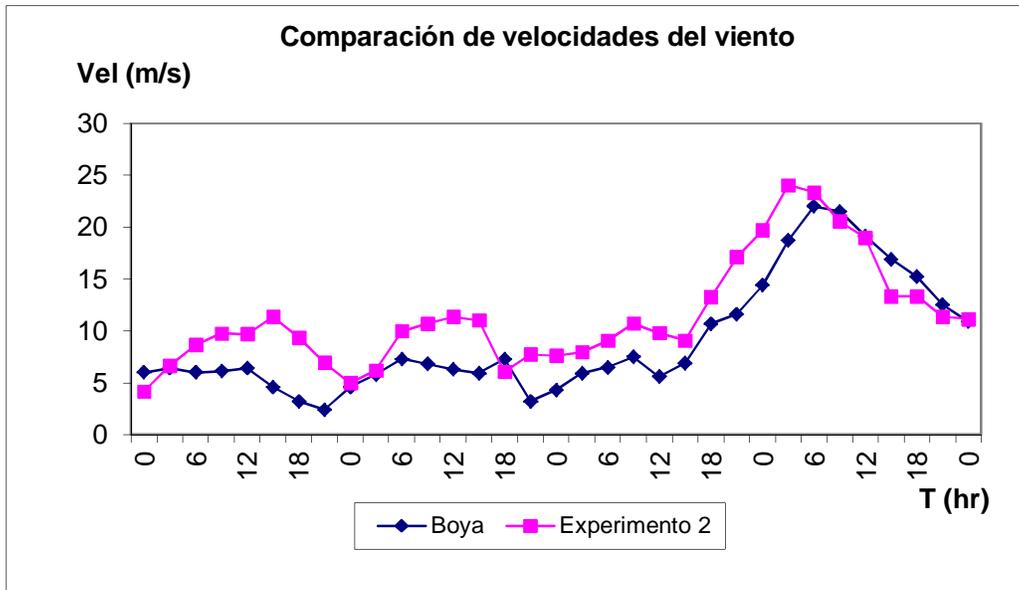


Figura 4.1. Simulación del huracán Dean Experimento 2.

Al igual que en la simulación anterior se obtiene los mismos perfiles en los resultados, visualmente es difícil saber si hay un cambio en la trayectoria pero ahora lo importante es observar el proceso del huracán por la parte del Golfo de México, notando la presión mínima (representada en color azul) como los vectores de viento (velocidad) tienden a ser graduales y constantes para dicha zona.



Grafica 4.1. Datos de Velocidad vs Tiempo.

El énfasis marcado por las velocidades del viento entre la boya y el modelo 2 son paralelas para la mitad del tiempo en desarrollo, en el comienzo existen variaciones que se pueden observar. (Graf. 4.1.)

Simulación no. 3. Se continúa con un ajuste a la ecuación de Cúmulos, se utilizó la ecuación de Grell-Devenyi en el modelo WRF con el propósito de crear un conjunto

de previsiones cuantitativas de precipitación, esto podría significar una mejora en la trayectoria la cual se analizara posteriormente. (Fig. 4.2.)

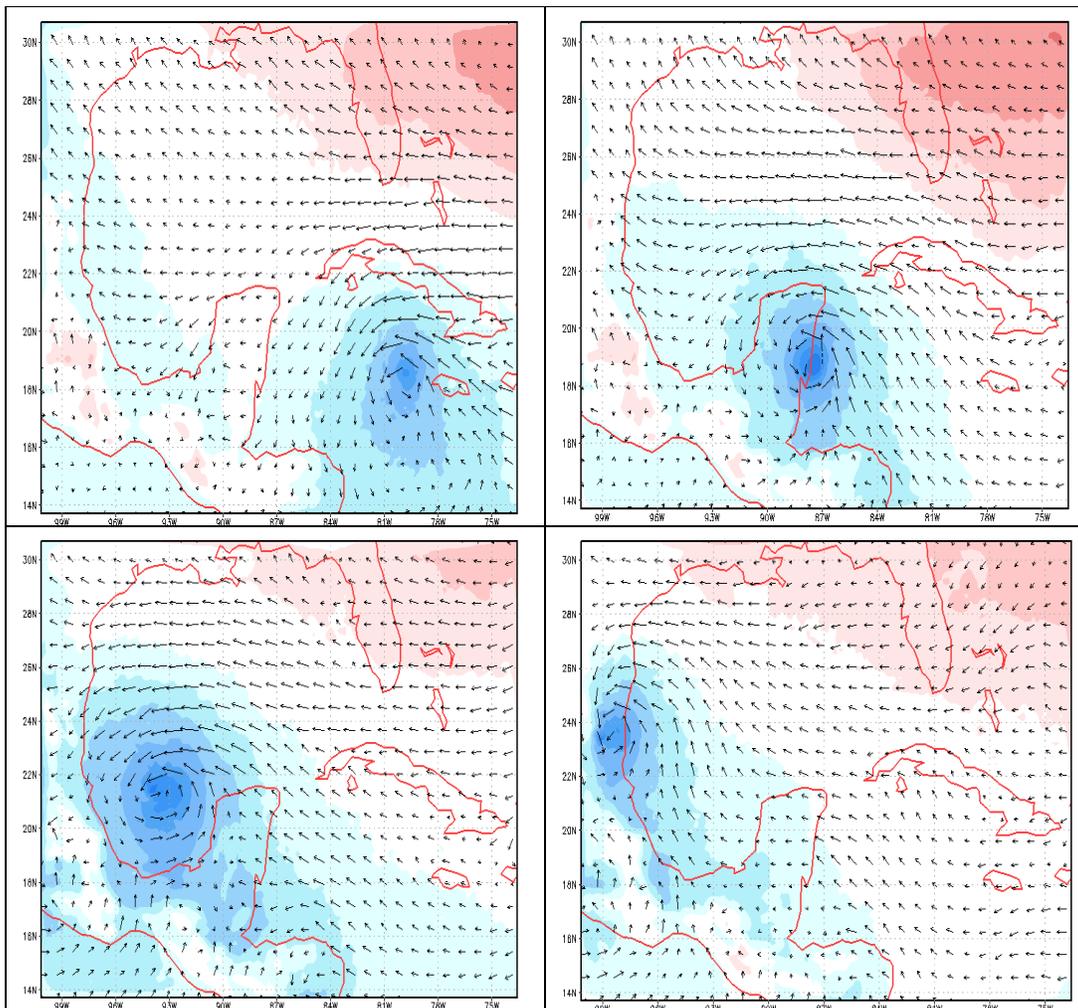
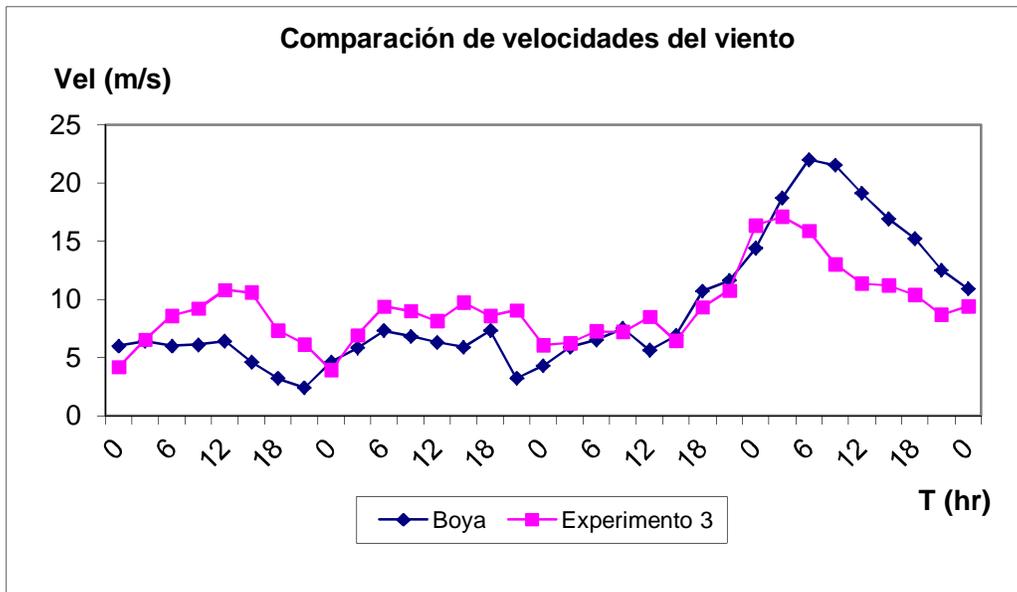


Figura 4.2. Simulación del huracán Dean Experimento 3.

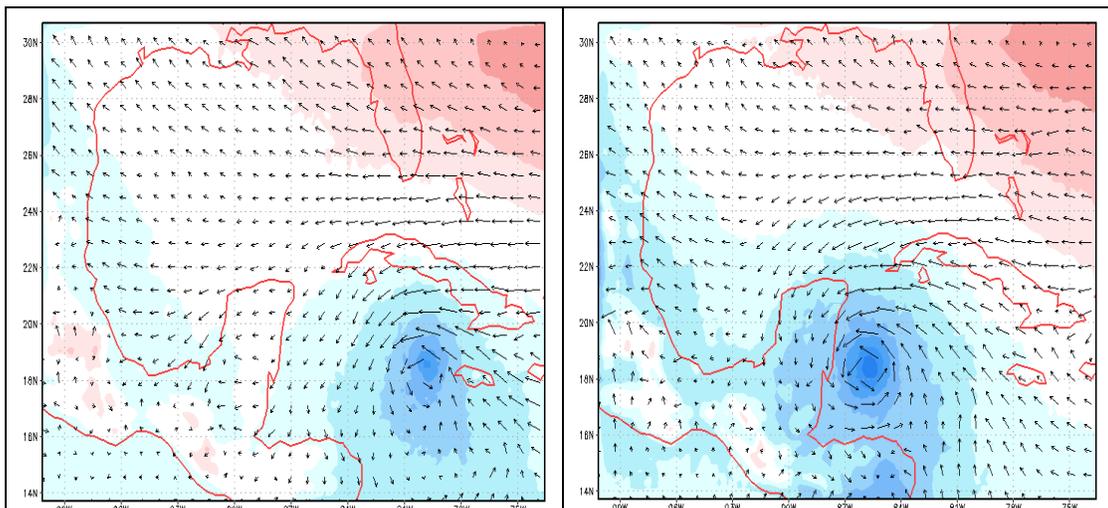
Observamos el mismo ajuste de perfil que en los resultados anteriores, visualmente se observa una ligera modificación en la trayectoria pero el área de interés (instalaciones de Cantarell) se ven afectadas por las presiones mínimas del huracán así como la velocidad del viento que trae consigo este fenómeno.



Grafica 4.2. Datos de Velocidad vs Tiempo.

El ajuste para la gráfica 4.2. presenta al principio una discrepancia en el inicio dando para el experimento 3 mayores velocidades del viento que lo obtenido para la boya, para el tiempo siguiente se encuentra un equilibrio de este parámetro para finalmente obtener un máximo mayor la boya a comparación de la simulación 3.

Simulación no. 4. El cual involucra una nueva propuesta en la parametrización de la microfísica la cual emula los procesos de nubes y de precipitación quitando el exceso de la humedad atmosférica, en primer instancia se trabajó con la ecuación de WRF Single-Moment 5 (WSM), la cual está implícita por el modelo, más diversas ecuaciones adicionales en el desarrollo que pueden ser analizadas en la tabla 4.0. (Fig. 4.3.)



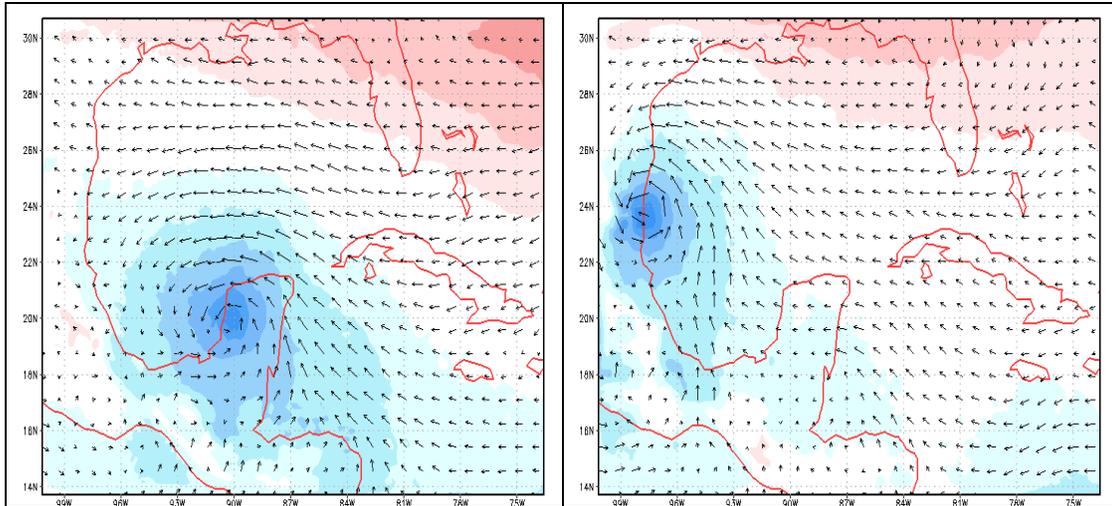
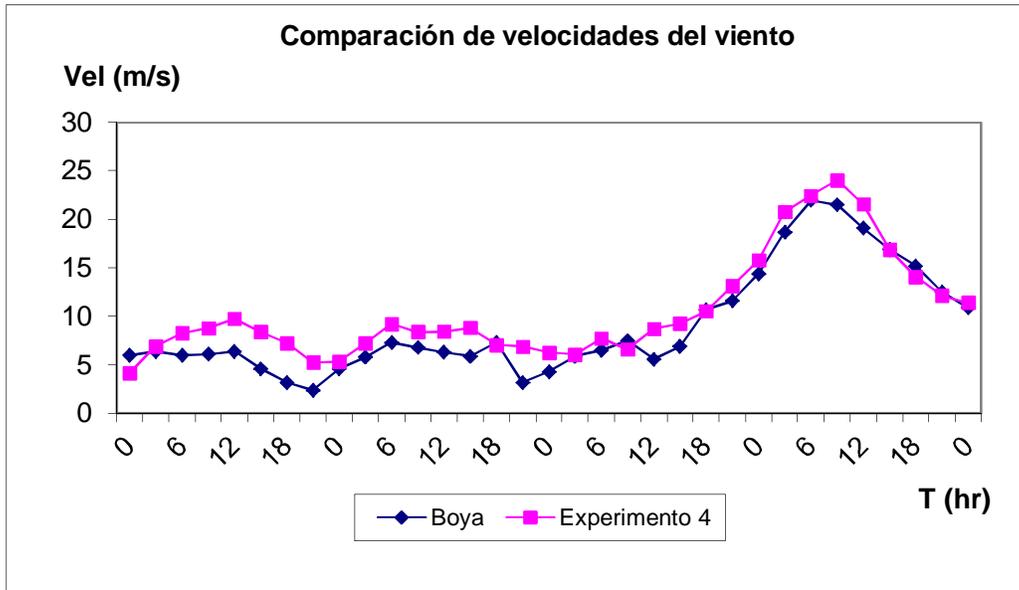


Figura 4.3. Simulación del huracán Dean Experimento 4.

Para esta modelación gráficamente se puede observar una elevación en el ojo del huracán así como el gran radio de afectación de las presiones bajas (color azul y sus degradaciones) pero no podemos adelantarnos a dar una respuesta acertada solo con este proceso, solo se ha obtenido una parte de la simulación necesaria.



Grafica 4.3. Datos de Velocidad vs Tiempo.

El experimento 4 se puede considerar un ejemplo claro que el ajuste de ecuaciones pueden representar lo más cercano a la naturaleza, la tendencia de las dos graficas como se pueden observar son prácticamente iguales y los puntos de comparación son igualmente parecidos.

Simulación no. 5. El desarrollo de la ecuación de Ferrier, que permite el manejo de la microfísica operacional, creando un esquema simple y eficiente para el procesamiento de fases mixtas.

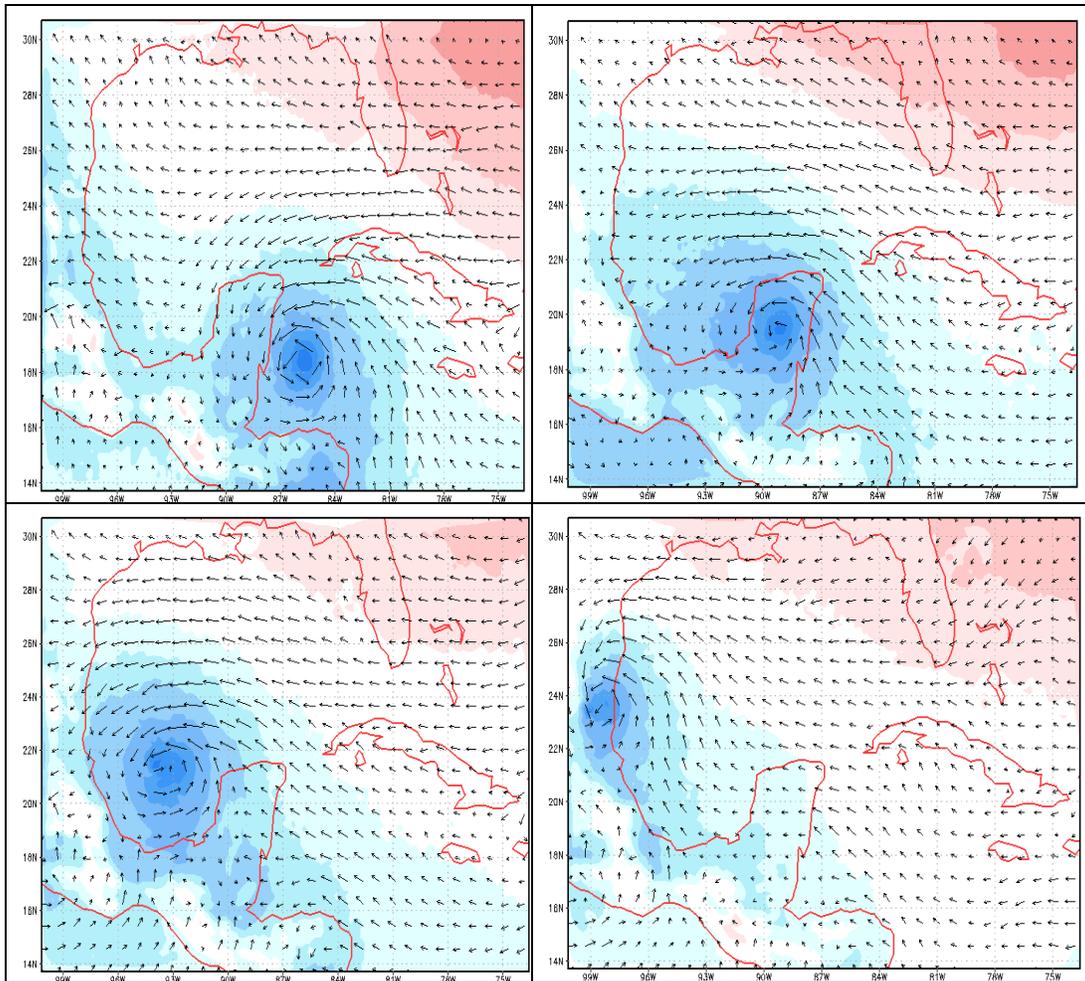
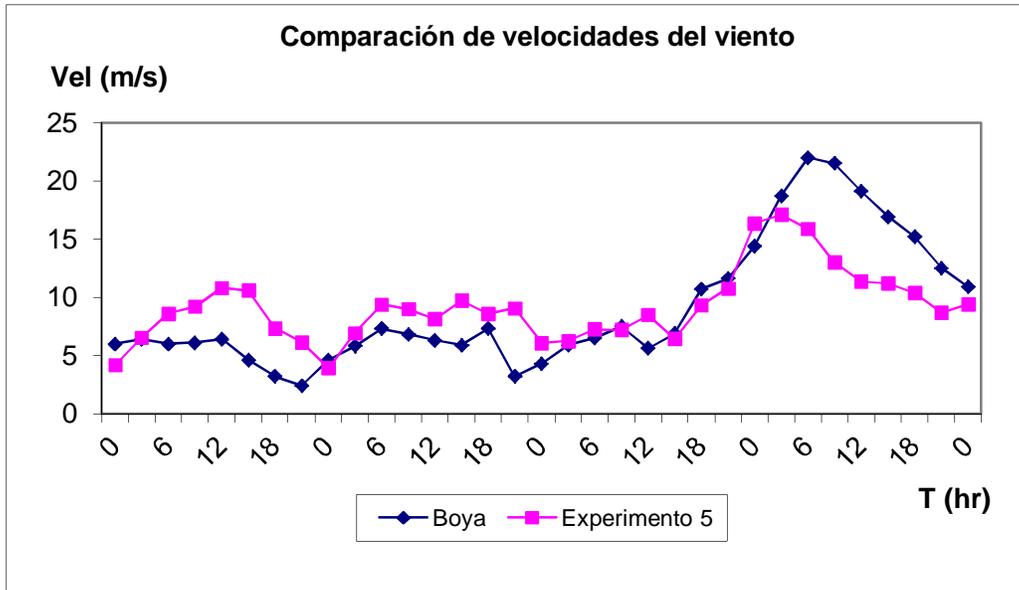


Figura 4.4. Simulación del huracán Dean Experimento 5.

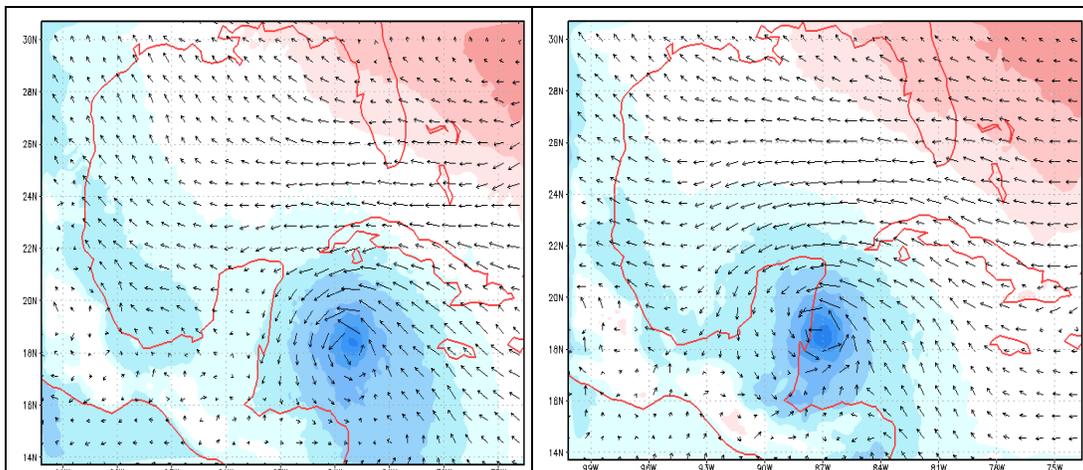
Como resultante grafico existe una notable similitud con la ecuación del experimento 4 a simple vista, siguen presentes los mismos elementos de las figuras anteriores, para conocer a fondo las diferencias es preciso hacer otro análisis que se realizara posteriormente.



Grafica 4.4. Datos de Velocidad vs Tiempo.

Para la gráfica 4.4. se distingue un ajuste notable, no fue tan excelente como el visto anteriormente pero entra en el rango de una calidad aceptada, donde el modelo cumple los requerimientos que el usuario necesita.

Simulación no. 6. Por ultimo en esta simulación sigue la tendencia en el cambio de la microfísica, es decir del parámetro se obtiene una nueva ecuación que va a gobernar a la modelación realizada, en este caso se presenta a “WSM 6 - class graupel”, que realiza un esquema con hielo y nieve, es adecuada para simulaciones en alta resolución. (Fig. 4.5.)



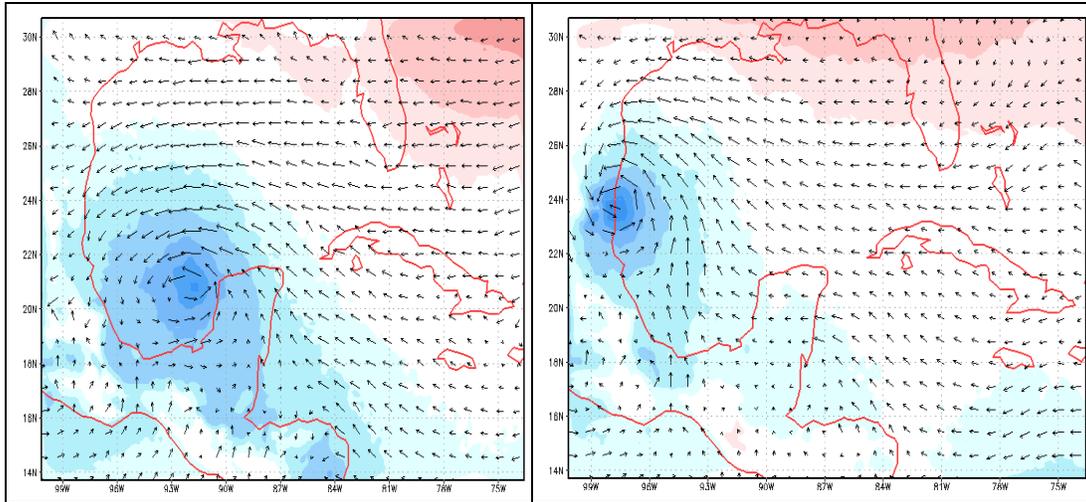
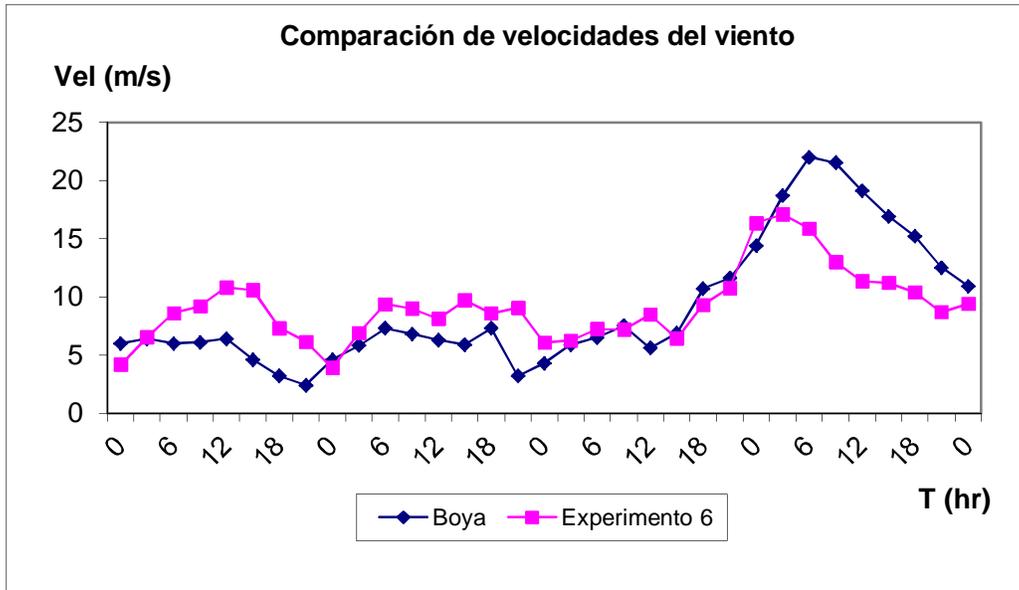


Figura 4.5. Simulación del huracán Dean Experimento 6.

Para finalizar el conjunto de simulaciones realizadas con diversos parámetros obtenemos la última secuencia del modelo con la ecuación antes mencionada, cabe señalar que por el momento todo lo realizado fue para obtener datos, comparaciones y para aplicarlo al siguiente procedimiento que nos dará detalladamente un análisis mas enfocado de lo que se busca.



Grafica 4.5. Datos de Velocidad vs Tiempo.

La última comparación de parámetros entre la boya y lo simulado presenta una condición ideal, tiene algunas fallas en el principio del tiempo pero conforme avanza se ajusta más a lo necesario, el factor de error puede presentarse hacia la recta final de las gráficas pero cumple con lo necesario para esta tesis.

4.1.2. Trayectorias de la física

Al realizar las diferentes modelaciones para el mismo huracán se obtuvo diversas salidas que son necesarias para la continuación de la gestión de riesgo, el modelo permite obtener un archivo de salida el cual contiene detalladamente los datos del año, mes, día, hora, minutos de nuestra elección, aparte de variables como presión, velocidad del viento, factores vectoriales, etc. Para la realización de esta tesis el factor de más importancia fue la presión de superficie al nivel del mar (por sus siglas SLP), este parámetro permitirá construir la trayectoria que tomará cada una de las simulaciones con las diversas ecuaciones que se usaron para el proceso de esta tesis.

El arreglo para las trayectorias se hizo a través de un script programado en GRADS, el cual va midiendo por cada cuadrante la presión mínima y graficándola, cada simulación tendrá un color en especial el cual permitirá su fácil observación.

Se utilizarán las seis simulaciones realizadas del huracán Dean, más otra anexa llamada "observada" la cual es lo que realmente se midió y ocurrió, es decir el evento real, el cual se tomara de base para interpretar las otras simulaciones y su asertividad en la ruta que se realizó, por lógica, se sabe que un modelo nunca va a dar un acercamiento del 100% a lo ocurrido realmente, pero puede dar indicadores para escoger las mejores herramientas para la prevención de un evento como el que se está estudiando. (Fig. 4.6)

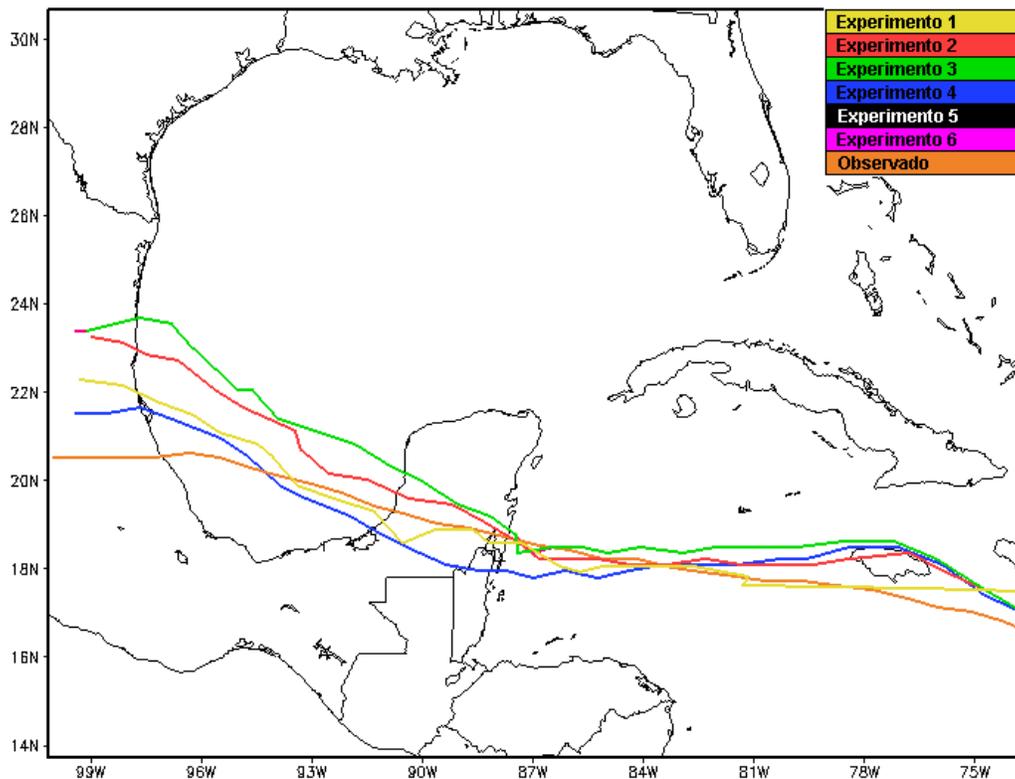


Figura 4.6. Trayectorias de las diversas parametrizaciones.

En la imagen anterior se observa un dominio que representa al Golfo de México, una parte del Océano Atlántico, geográficamente se observa parte del territorio de Estados Unidos, México, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Cuba y Jamaica, el huracán como se mencionó en el capítulo 2 tiene una trayectoria proveniente de la costa occidental del África y termina en la parte de norte de Veracruz.

La línea de color café representa al huracán observado, los colores adyacentes pertenecen a los simulados por el WRF, visualmente notamos ciertas discrepancias en ciertos sectores geográficos y en otros tener convergencia, pero la tendencia de las trayectorias es ínfima.

Como se ha mencionado constantemente este trabajo intenta adaptar un sistema para la gestión de riesgo en la región de la Sonda de Campeche donde se encuentra ubicado el Complejo Cantarell, las simulaciones realizadas para este caso en general fueron certeras en un 80%, fallando dos de las simulaciones que se realizaron, por lo tanto para un mayor énfasis se elaboró una tabla con los diversos parámetros obtenidos. (Tab. 4.1)

| Zona de interés (Complejo Cantarell) Coordenadas 20 N 94 W | | | | | |
|---|---|------------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------|
| Experimento | Velocidad Máxima [ms⁻¹] | Presión Mínima [mb] | Acercamiento [km] | Precisión [%] | Color |
| 1 | 20.9031 | 1000.29 | Alto (1 a 20) | 90 | Mostaza |
| 2 | 21.0042 | 1001.47 | Intermedio(20 a 50) | 70 | Rojo |
| 3 | 13.1626 | 1004.12 | Bajo(<50) | 50 | Verde |
| 4 | 20.664 | 1002.55 | Alto (1 a 20) | 90 | Azul |
| 5 | 17.8216 | 1004.24 | Alto (1 a 20) | 90 | Negro |
| 6 | 17.8216 | 1004.24 | Bajo(<50) | 50 | Rosa |
| Observada | 25.92832 | 970 | Intermedio(20 a 50) | 70 | Café |

Tabla 4.1. Resultados de la asimilación de datos del huracán Dean.

4.2. SIMULACIÓN DEL NORTE NO. 4

Para el modelado del Frente Frío no.4 solo se realizó una simulación, esto sucede porque la física del Norte no varía demasiado con las parametrizaciones seleccionadas, las parametrizaciones usadas son en su totalidad las mismas usadas para el caso del huracán Dean en el modelo 1, se mostrará en la tabla 4.1, las opciones de ecuaciones utilizadas para la siguiente simulación.

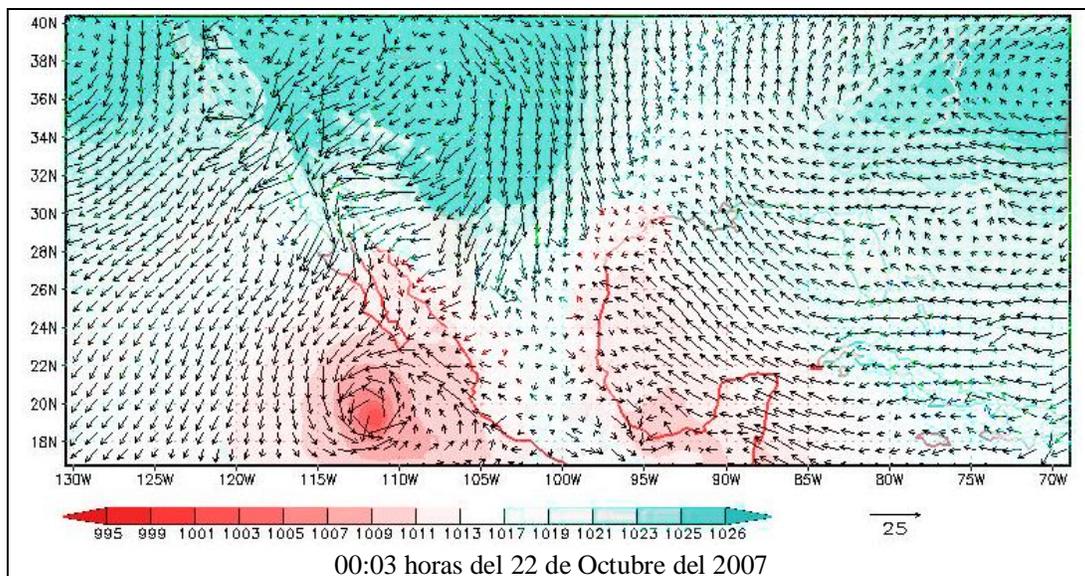
| Modelo | Microfísica | Parametrización de cúmulos | Esq. de capa límite | Ensamble multi-física |
|--------|---|-------------------------------|---------------------------------|--|
| 1 | WRF Single-Moment (WSM) 3-class simple ice scheme | Kain-Fritsch (new Eta) scheme | Monin-Obukhov Similarity scheme | La ecuación de Kain Fritsch es una parametrización de flujo de masa, la inestabilidad del crecimiento de nubes y en sus propiedades. |

Tabla 4.1. Opciones físicas y esquemas de asimilación de datos de los miembros del ensamble del Norte No. 4.

Se configuró un solo dominio de 15 kilómetros de resolución horizontal, una resolución geográfica de 10 minutos, con 200 puntos de malla en “x” por 89 puntos de malla en “y”, centrado en latitud 29,20° N y longitud 99,65° W. La integración se llevó a cabo con un paso de tiempo de 3 horas para cinco días de pronóstico, que comprende del 20 (00 “Z”) al 25 (00 “Z”) de octubre del 2007. Los 30 niveles de presión se interpolaron a 28 coordenadas verticales sigma. Se consideró este periodo para ver el desempeño del ensamble en pronosticar la intensificación del Frente Frío en la parte norte de Frontera, Tabasco.

4.2.1. Modelación de la física

Simulación única. Se realizó el modelado siguiendo una parametrización “control”. (Tab. 4.1.)



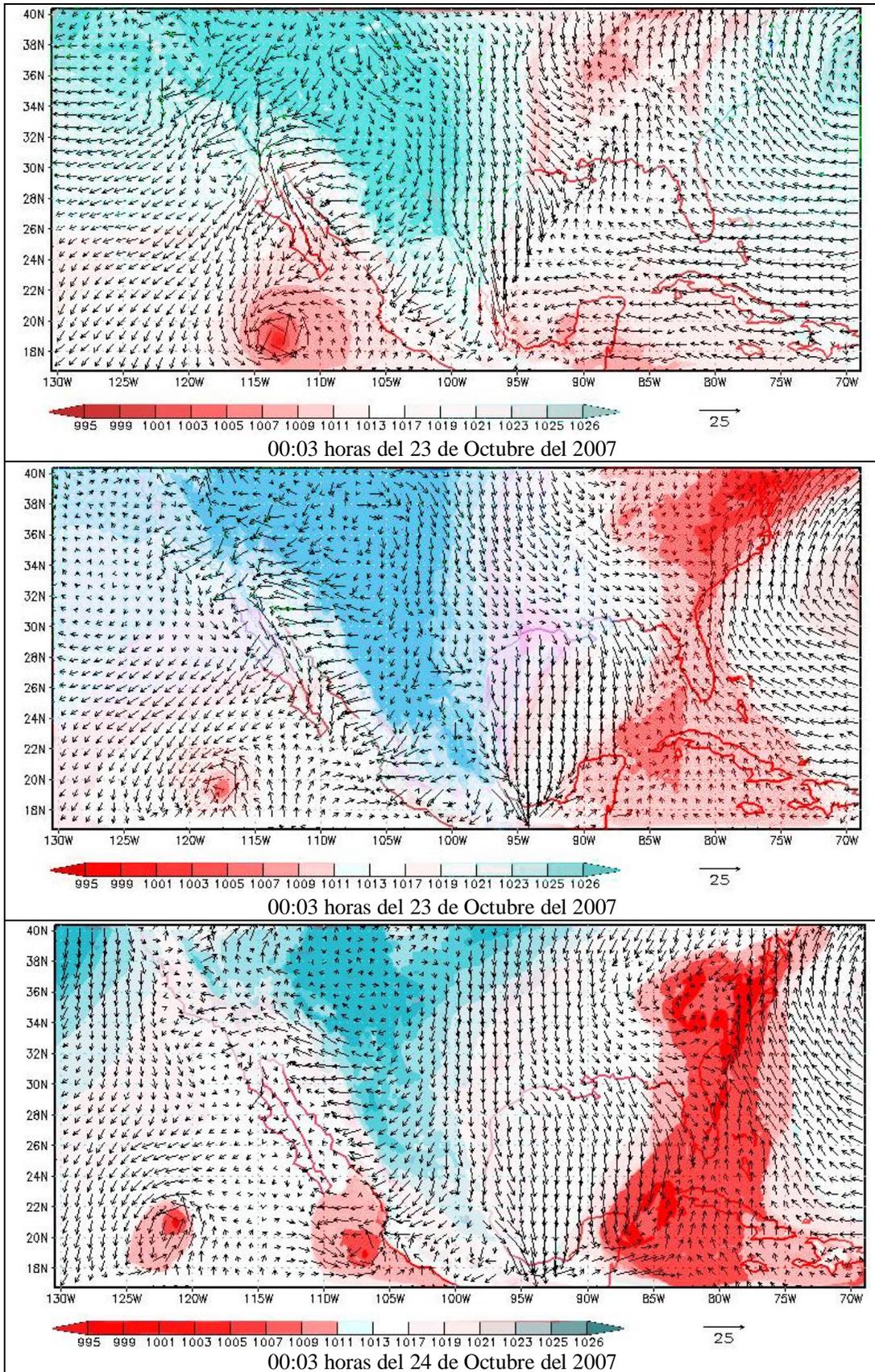
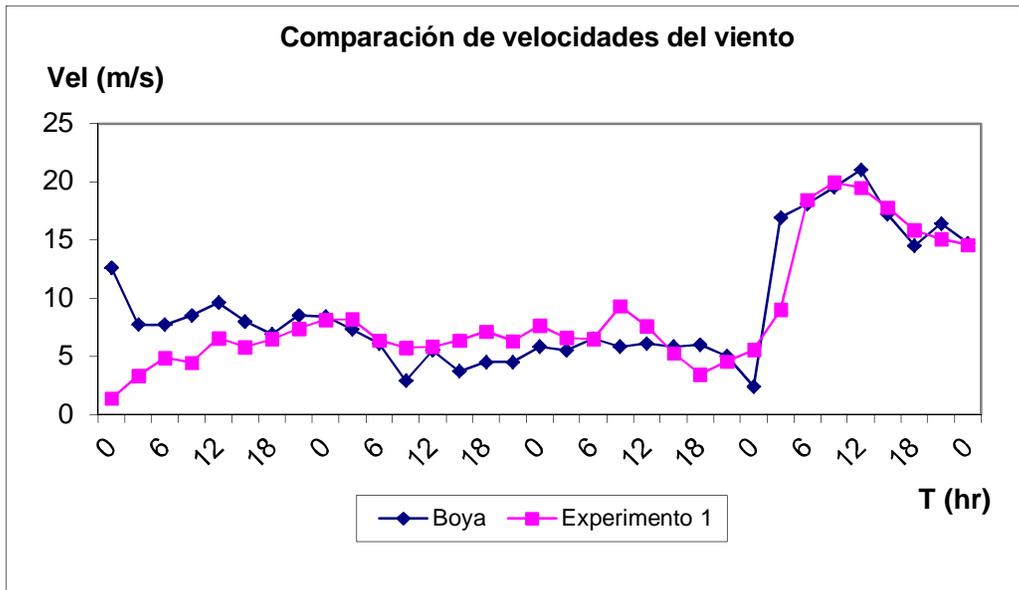


Figura 4.6. Simulación del Frente Frío no. 4, Experimento 1.

La masa de aire frío (color rojo) tiene un movimiento descendente del norte hacia el sur, aproximándose a la región suroeste del Golfo de México acercándose a la masa de aire caliente representada en color azul. El aire frío, siendo más denso, genera una "cuña" y se mete por debajo del aire cálido que es menos denso.

A través de la simulación se observa que los Frentes Fríos se mueven rápidamente. El Norte causó perturbaciones atmosféricas tales como tormentas de truenos, chubascos, tornados (se observan en la parte inferior de la figura) y vientos fuertes, acompañados de condiciones secas a medida que el Frente avanza. Por la época del año y de su localización geográfica, se modeló para 5 días. (Fig. 4.6.)



Grafica 4.6. Datos de Velocidad vs Tiempo.

La medición de datos por parte de la boya "Station 42906 Petrolia" que presento en la fecha del 20 a 25 de octubre del 2007, fueron comparados con los datos realizados por el modelo atmosférico WRF con esto tenemos un conocimiento más acertado de la simulación, en la gráfica 4.6. se observó que para el principio del día 20 el modelo presento velocidades mínimas mientras la velocidad de la boya era mucho mayor pero conforme pasan las horas (recordar que tienen un lapso de 6 [hr] en cada una) la tendencia fue mejorando hasta que al final de la modelación que prácticamente es lo mismo.

5.0. RESULTADOS Y SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA AL SECTOR PETROLERO EN MÉXICO

La incorporación de un sistema de vigilancia o de emisión de alertas para detectar cuando los niveles de un huracán o Norte sobrepasen los parámetros de medición aceptables ante el pronóstico de oleaje intenso y vientos fuertes, como adoptar la práctica obligatoria de toma de decisiones necesarias para proporcionar la mayor estabilidad posible a las plataformas, es uno de los desafíos que pretende dar solución este trabajo.

Con los resultados presentados del proceso de modelado de los dos eventos meteorológicos extremos encontramos datos fundamentales para trabajar en un semáforo que muestre el nivel de peligro que puede representar determinados factores tales como el viento, que a determinada velocidad pueden proporcionar el tipo de daño que ejercen a estructuras, para saber con certeza esto, se trabajó con la integral de la energía cinética desarrollada por Powell y Reinhold, la cual proponen una alternativa a la escala de Saffir-Simpson usando los valores tomados de vientos huracanados, si bien, la energía cinética puede relacionarse bien con los análisis de carga del viento sobre las estructuras, podría decirse que al menos es la característica de cualquier tormenta severa, al obtener los valores de dicha integral el procedimiento a seguir es con un par de ecuaciones, las cuales, indicarán el potencial de daño tanto por viento, marea y olas, realizando los respectivos procedimientos matemáticos.

5.1. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En primer lugar al recrear las situaciones simuladas de los eventos que impactaron las instalaciones de PEMEX se trabajó con la metodología de “pronóstico por ensamble” para el casos de eventos meteorológicos extremos en la zona del Golfo de México tales como huracanes y Nortes. Se utilizó el modelo atmosférico WRF, 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 NARR.

Para la condición inicial del ensamble se variaron los esquemas de asimilación de datos y opciones en la física del modelo, las simulaciones del ensamble fueron comparadas con el experimento de control, para ver el impacto que tiene la asimilación de datos en el pronóstico futuro. Teniendo en base 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. Al empezar el análisis del huracán Dean encontramos que:

- Para la primera simulación, el error de análisis fijó un límite de predictibilidad en los pronósticos de intensidad y trayectoria del huracán Dean, donde la gran dispersión se llevó a cabo dentro del área territorial, el margen en la trayectoria se acoplo en el sitio de interés, pero su precisión quedó comprometida por la

configuración de su ensamble. El experimento de comparación de velocidad se presenta un ajuste apropiado.

- Para el segundo caso, al haber modificado el ensamble con la implementación de Betts-Miller-Janjic scheme, los pronósticos de intensidad y trayectoria del ciclón fueron significativamente inferiores que en el primer caso, ya que los errores en el pronóstico de trayectoria aumentaron significativamente. En la comparación de velocidades del viento se tiene un visible margen de similitud.
- En la tercera simulación en términos probabilísticos, el ensamble no fue preciso en la trayectoria que obtuvo por su paso en el Golfo de Mexico, así como su disipación sobre la región noroeste del país, el ensamble presentado de Grell-Devenyi ensemble scheme y Monin-Obukhov Similarity scheme no fueron los ideales y en las comparaciones de velocidad contra tiempo también es de notarse la discrepancia que presentan ambas gráficas.
- Para el cuarto modelo, la implementación del ensamble conformado por Kain-Fritsch (new Eta) scheme y Monin-Obukhov Similarity scheme modificaron los pronósticos de intensidad y trayectoria del huracán que fueron significativamente mejores que en los casos anteriores, los errores en el pronóstico de trayectoria disminuyeron considerablemente. El ensamble así como su disipación sobre la región fue preciso, en la comparación de velocidades presentó la mejor tendencia que en casos anteriores.
- Con el quinto experimento presentó una misma intensidad como trayectoria que el experimento cuarto, existen unas diferencias mínimas en la parte del Mar del Caribe, pero prácticamente es la misma modelación que el caso anterior. En la parte de comparación de la velocidad del viento se nota cierta incertidumbre con lo obtenido en la boya Station 42906.
- Por ultimo en la sexta simulación tiene resultados muy parecidos al segundo caso, presenta una diferencia significativa en el Mar del Caribe como en el experimento cuarto, pero la trayectoria de importancia es igual a la antes mencionada. En la gráfica velocidad contra tiempo se observa un conveniente ajuste de ambas gráficas.
- Para el caso del Norte la simulación fue realizada en función al esquema base del modelo atmosférico WRF, el análisis para los parámetros de los valores mínimos de presión y máximos de intensidad del viento presentaron un ajuste apropiado y en el ajuste de graficas es muy equitativa a excepción de las partes de la región terrestre.

Como etapa final obtenemos datos por medio del modelo atmosférico WRF, utilizando las coordenadas de interés ubicadas en las coordenadas 20 N 94 W (Tabla 4.1. del capítulo 4) con las cuales se trabajará en las ecuaciones matemáticas en el siguiente subtema y para el Norte se explicara más adelante.

5.2. INTEGRAL DE ENERGÍA CINÉTICA

La integral de energía cinética (por sus siglas en inglés IKE) es un indicador del potencial destructivo, se calcula a partir de la superficie del campo de viento mediante la integración de 10 metros en el nivel de la energía cinética por unidad de volumen en partes iguales del dominio de la tormenta, integra velocidades del viento en superficie dentro de rangos específicos, asumiendo una densidad del aire (ρ) de 1 [kg m⁻³].

$$IKE = \int_v \frac{1}{2} \rho U^2 dV$$

La energía cinética es relevante para el potencial eólico destructivo porque se escala con la presión del viento (carga de viento) que actúan en una estructura (ASCE, 2005). Sin embargo, gran parte de la construcción en el medio ambiente se compone de estructuras caracterizadas por fallas frágiles en los componentes y sistemas que llevan al rápido aumento en el daño y la pérdida de la estructura o edificio. Para tener en cuenta en este proceso, IKE es segregada en bajo, moderado, y gamas de alta velocidad del viento multiplicada por un factor de daño representante.

La velocidad máxima sostenida del viento en superficie como la escala Saffir-Simpson son malos indicadores en el potencial destructivo de un huracán, la integral de energía cinética es más relevante para los daños provocados por el viento, mareas de tempestad y las olas. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (por sus siglas en inglés NOAA) público en su portal la oportunidad de hacer uso del “app IKE Calculator”, que es la representación programada de la integral de energía cinética (http://www.aoml.noaa.gov/hrd/ike/Calculator_AllQuad.php).

Esta calculadora permite estimar el IKE y el potencial del SDP basado en las estimaciones de la medida exterior de la tormenta tropical (TS), a 50 [kt] (26 [m/s]), y los vientos huracanados (H) en cada cuadrante de la tormenta. Estas estimaciones se basan en campos de vientos intensos supuestos (Powell y Reinhold, 2007).

Para hacer uso de esta aplicación es preciso tener los siguientes datos:

- **Rmax [nm]** Radio máximo que presente el huracán
- **Vmax [kt]** Velocidad máxima del viento que presente el huracán
- **Radio [nm]** del viento con 34 [kt] (17.5 [m/s]), 50 [kt] (26 [m/s]) y 64 [kt] (33 [m/s]) en cada cuadrante.

Para obtener la Velocidad Máxima (Vmax) del viento se dispone de dos formas:

1. Encontrar el dato en páginas especializadas donde dispongan del historial de los parámetros acontecidos. Tradicionalmente se medían directamente por avión o por la distribución de la presión en la superficie del mar. Más recientemente, Hsu propuso que podría determinarse a partir de las mediciones por satélite basado en la distancia entre la temperatura más fría cerca del ojo y la más sección más cálida dentro del ojo del huracán (Hsu et al., 2000).

2. Existe una función empírica basada en la teoría de Anthes donde se analiza la variación de la velocidad máxima del viento (V_{max}) en huracanes tropicales y es descrita con la siguiente ecuación (Anthes, 1982):

$$V_{max} = 6.3(1013 + P_o)^{1/2}$$

Dónde:

- **Po [mb]** Presión a nivel del mar (observada)

La calculadora IKE presenta los siguientes resultados:

- El cuadro de la tormenta IKE total TS-50 (TJ) es el resultado que muestra la cantidad de energía cinética en Tera Joules aportados por los vientos de mayor o igual fuerza de una tormenta tropical 34 nudos (17.5 [m/s]), pero menos de 50 nudos (26 [m/s]).
- El cuadro de la tormenta IKE total de 50 H (TJ) es el resultado que muestra la cantidad de energía cinética aportados por los vientos de mayor o igual a 50 nudos (26 [m/s]), pero de menos fuerza a la de un huracán.
- El cuadro de la tormenta IKE total H (TJ) es el resultado que muestra la cantidad de energía cinética aportada por los vientos superiores a la fuerza de un huracán 64 nudos (33 [m/s]).
- El cuadro de SDP es el potencial de la marejada destructiva basada en una escala de cero a seis. SDP se interpreta similar a la escala de Saffir-Simpson en donde las tormentas más destructivas son valoradas por encima de 5, existe una ecuación la cual nos permite obtenerla de una manera más específica y se presenta a continuación.

5.3. MAREAS DE TEMPESTAD Y POTENCIAL DESTRUCTIVO DE OLAS (SDP)

Las mareas de tempestad / potencial destructivo de olas (por sus siglas en ingles SDP) es una medida objetiva del forzamiento en el campo del viento, basado en una escala de tormentas modeladas (Texas A&M, Jennifer Irlandés, 2009), el SDP tiene una fuerte relación en la medida de inundaciones costeras superior a 1 [m], pero una pobre relación al pico de sobretensión.

$$S_{DP} = 0.676 + 0.43\sqrt{IKE_{TS}} - 0.0176(\sqrt{IKE_{TS}} - 6.5)^2$$

Es útil para la gestión de emergencias y en aplicaciones de preparación para tormentas. La fuerza de la escala SDP proporciona un medio objetivo para comparar una tormenta actual a las tormentas históricas en la misma zona sobre la base de la igualdad de condiciones.

5.4. POTENCIAL DE DAÑO DEL VIENTO WDP

Las marejadas como las olas generadas por el esfuerzo cortante del viento en la superficie del océano pueden cuantificarse con la energía cinética. Si bien la dependencia inicial del coeficiente de resistencia de la superficie del mar es lineal con la velocidad del viento, las investigaciones de Powell (Powell et al 2003; Donelan et al 2004) sugieren que los niveles de coeficiente de arrastre disminuyen en vientos superiores a 33 [ms⁻¹], lo que sugiere una dependencia continua en la velocidad del viento (Cline, 1920).

Estas ondas generan un flujo hacia la costa del momento conocida como tensión de radiación (Longuet-Higgins y Stewart, 1964), que contribuye a la configuración en las olas como a los niveles elevados del agua mucho antes de tocar tierra.

En consecuencia, el historial de valores de IKE en las horas y días antes de tocar tierra es probable que proporcionen una estimación acertada de la onda y el potencial destructivo de la oleada.

Las tormentas con vientos de 55 [ms⁻¹] se incluirán en el viento potencial destructivo (WDP), basado en la suma de los daños ponderados de IKE. Una tormenta no necesita ser un huracán para que sea clasificado con WDP.

$$W_{DP} < 4 = 0.67 + 0.017(IKE_{25-40} + 6IKE_{41-54}) - 5.4 \times 10^{-5} [(IKE_{25-40} + 6IKE_{41-54}) - 109.6]^2$$

La ecuación de WDP mayor a 4 se asigna a las tormentas con vientos ≥ 55 [ms⁻¹] y se basan en la contribución de IKE (Powell & Reinhold, 2007).

5.5. RESULTADOS DEL PROCESO DE IKE, SDP Y WDP PARA EL HURACAN DEAN

Empleando las ecuaciones definidas anteriormente se realiza el procedimiento con los datos obtenidos por los diversos experimentos ejecutados en el modelo WRF, éstos tienen un lapso de 6 horas para el 21 de octubre del 2007; ¿Por qué este día en especial? El día 21 de octubre fue cuando se presentó el mayor impacto del huracán a las instalaciones petroleras en Cantarell, lo cual atribuyo el cierre de plataformas y creando una pérdida de producción como económica tal como se mencionó en el capítulo 3 de esta tesis.

Al reunir estos resultados será posible crear un semáforo de prevención para eventos de esta naturaleza, se trabajara con el mismo sistema de experimentos presentados en la tabla 4.0. del capítulo 4 de esta tesis.

09:00 del 21 de Agosto del 2007

| | Storm Total IKE TS-50 (TJ) | Storm Total IKE 50-H (TJ) | Storm Total IKE H (TJ) | IKE TS(TJ) |
|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| *Observado | 0.347 | 0.106 | 0.957 | 1.41 |
| Experimento 1 | 1.306 | 1.553 | 0.1 | 2.859 |
| Experimento 2 | 1.477 | 7.35 | 0.1 | 8.829 |
| Experimento 3 | 1.48 | 7.35 | 0.1 | 8.83 |
| Experimento 4 | 2.392 | 1.14 | 1.645 | 5.177 |
| Experimento 5 | 1.477 | 7.35 | 0.1 | 8.829 |
| Experimento 6 | 1.48 | 7.35 | 0.1 | 8.83 |

* Observado. Fenómeno meteorológico ocurrido y analizado a fondo por dependencias tales como NOAA, los criterios del evento de esta tesis fueron tomados de NARR y NOAA.

15:00 del 21 de Agosto del 2007

| | Storm Total IKE TS-50 (TJ) | Storm Total IKE 50-H (TJ) | Storm Total IKE H (TJ) | IKE TS(TJ) |
|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Observado | 1.242 | 0.624 | 2.358 | 4.224 |
| Experimento 1 | 2.19 | 1.256 | 0.1 | 3.446 |
| Experimento 2 | 3.136 | 1.885 | 0.1 | 5.021 |
| Experimento 3 | 1.387 | 0.72 | 3.122 | 5.229 |
| Experimento 4 | 1.32 | 0.674 | 2.766 | 4.76 |
| Experimento 5 | 3.136 | 1.885 | 0.1 | 5.021 |
| Experimento 6 | 3.04 | 1.678 | 0.1 | 4.718 |

09:00 del 21 de Agosto del 2007

15:00 del 21 de Agosto del 2007

| | SDP | WDP | SDP | WDP |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
| Observado | 0.344 | 4.03069292 | 1.411 | 4.10300208 |
| Experimento 1 | 0.943 | 4.0752754 | 1.166 | 4.0882241 |
| Experimento 2 | 2.005 | 4.16346853 | 1.609 | 4.11614327 |
| Experimento 3 | 2.01 | 4.16347879 | 1.653 | 4.11931372 |
| Experimento 4 | 1.642 | 4.11853002 | 1.55 | 4.11202358 |
| Experimento 5 | 2.005 | 4.16346853 | 1.609 | 4.11614327 |
| Experimento 6 | 2.01 | 4.16347879 | 1.54 | 4.111345 |

5.6. RESULTADOS DEL PROCESO DE IKE, SDP Y WDP PARA NORTE NO. 4

La integral de Energía Cinética fue creada para huracanes, en esta ocasión se le dará un uso diferente en los llamados Nortes, considerando que este evento es totalmente diferente a un huracán, se intentara emular condiciones sin perjudicar su física existente.

Como existe una explicación previa del uso de las ecuaciones solo se presentaran los resultados del evento ajustándolos al día que tuvo el mayor impacto en la plataforma Usumacinta, está tiene una localización aproximada en latitud de 21° y longitud -93°, por lo cual se tomaron exclusivamente la presión a nivel de superficie empezando el día 23 de octubre del año 2007 a las 15.00 horas (lapsos de 6 horas entre cada uno) y finalizando el 23 del correspondiente mes y año a las 21.00 [hr], teniendo en cuenta que este día fue el de mayor afectación que obtuvo la plataforma Usumacinta

con el Norte asociado al Frente Frío no. 4, con los datos obtenidos se ingresara a la calculadora de IKE, el radio del viento se tomara con una aproximación porque es diferente a la de un huracán. Se realizaran dos experimentos: observado y la modelación control.

15:00 del 23 de Octubre del 2007

| | Storm Total IKE TS-50 (TJ) | Storm Total IKE 50-H (TJ) | Storm Total IKE H (TJ) | IKE TS(TJ) |
|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Observado | 2.351 | 0.705 | 0.012 | 3.056 |
| Experimento 1 | 2.24 | 0.447 | 0.11 | 2.687 |

21:00 del 23 de Octubre del 2007

| | Storm Total IKE TS-50 (TJ) | Storm Total IKE 50-H (TJ) | Storm Total IKE H (TJ) | IKE TS(TJ) |
|---------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Observado | 2.594 | 0.377 | 0.145 | 2.971 |
| Experimento 1 | 2.836 | 0.594 | 0.123 | 3.43 |

15:00 del 23 de Octubre del 2007

21:00 del 23 de Octubre del 2007

| | SDP | WDP | SDP | WDP |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
| Observado | 1.022 | 4.07983253 | 0.989 | 4.077895 |
| Experimento 1 | 0.872 | 4.07109278 | 1.16 | 4.08789457 |

Hasta aquí se presenta el desarrollo matemático por parte de los dos eventos meteorológicos que afectaron a las instalaciones de PEMEX, es preciso obtener un semáforo que comparta similitudes y pueda servir de apoyo para cuando surjan fenómenos como los antes mencionados, la siguiente parte de la tesis se enfocara en correlacionar, analizar y dar una interpretación fácil, que sirva de guía para prevenir tragedias futuras.

5.7. SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

Al obtener los resultados de las diversas modelaciones, se decidió construir un sistema de alerta temprana, en este caso, se basó en la teoría y la tabla informativa de Powell & Reinhold (Powell y Reinhold, 2008), la escala de huracanes de Saffir – Simpson, y correlacionando el criterio de daño a estructuras por viento (Dotzek, N., 2009); Se propuso una guía la cual con la velocidad del viento y los parámetros del SDP y WDP, una modificación de lo presentado por Saffir–Simpson con un ajuste del área de 200 [km] de aproximación al sitio de interés, es factible tener una alerta temprana al daño a estructuras que puede realizar un fenómeno meteorológico extremo. El caso del Norte fue un ajuste a las ecuaciones y escalas antes mencionadas pero vemos que su posterior aplicación dio buenos resultados. Recordar que es una propuesta con el desarrollo de los modelos atmosféricos y que son aproximaciones de los eventos meteorológicos extremos que ocurrieron.

| Sistema de Alerta Temprana en zonas costeras | | | |
|--|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Para un área cercana a 200 [km] del sitio de interés | | | |
| Velocidad del viento | Potencia del viento WDP | Destrucción de olas SDP | Mareas de tempestad SDP |
| [m/s] | Riesgo en el daño sobre las estructuras | | |
| 0.0 - 9.0 | Nul o | Bajo | Bajo |
| 10.0 – 17.0 | Bajo | Moderado | Moderado |
| 18.0 – 32.0 | Bajo | Moderado | Moderado |
| 33.0 - 44.0 | Moderado | Al to | Al to |
| 45.0 – 49.0 | Moderado | Al to | Al to |
| 50.0 – 69.0 | Al to | Extremo | Extremo |
| ≥70 | Extremo | Extremo | Extremo |

Tabla 5.0. Sistema de Alerta Temprana

Con la tabla anterior se puede tener un conocimiento más acertado del peligro que puede representar el oleaje, la velocidad del viento y las mareas para estructuras que se encuentren dentro del área de estos fenómenos meteorológicos extremos (Nortes y huracanes), en esta tesis se tuvo un enfoque al área petrolera pero puede tener un ajuste para cualquier tipo de instalación.

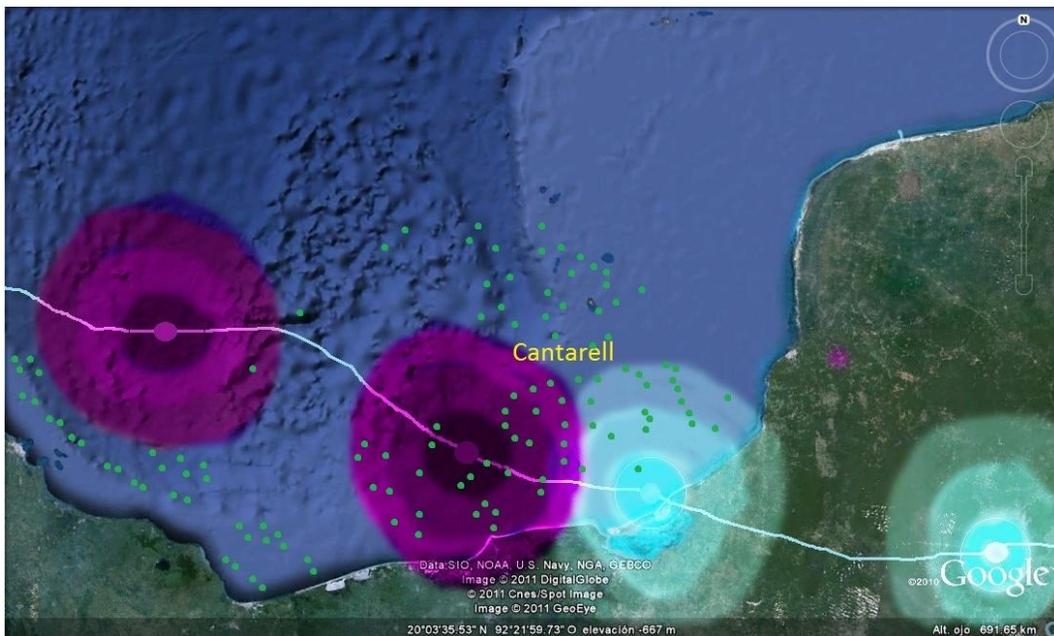


Figura 5.0. Vista integral del efecto de Dean a las instalaciones de PEMEX.

Se presenta en la figuras 5.0 y 5.1. un ejemplo de lo que podría ayudar la tabla 5.0., tomando el caso del experimento 4, trazamos la trayectoria del huracán, se grafican

los puntos significativos de la presión mínima a nivel del mar, se crea una área circunferencial de aproximadamente de 200 [km] donde la velocidad del viento es representada con el color que indica la tabla, los puntos verdes en la primera figura y amarillos en la segunda representan la localización de las plataformas petroleras dentro del Golfo de México. En la figura siguiente se observa como el paso del huracán Dean afecto a la mayor parte de la zona petrolera Cantarell, cuando este fenómeno presento un incremento de su velocidad vemos que en cuestión del potencial del viento fue moderado pero para las oleadas como la tempestad fue extremo, obligando el cierre inmediato de las plataformas que se encontraran en el área.

Recordar que la tabla 5.0 es una propuesta y no tiene nada que ver con lo relacionado de Saffir-Simpson, por lo tanto cuando la velocidad está en un rango de 33 a 49 [m/s] podríamos considerar que el huracán está en una categoría dos, la teoría de Saffir-Simpson indica que el daño puede ser bajo cuando en la realidad esto no ocurrió así por lo tanto en la tabla 5.0. propone factores diversos respecto al daño; Relacionando el viento obtenido correlacionando la integral IKE con sus respectivas ecuaciones, se obtiene un factor de daño más ajustado a la realidad. Con ello logrando dar un pronóstico más significativo para la infraestructura petrolera y augurando evitar pérdidas humanas como económicas.

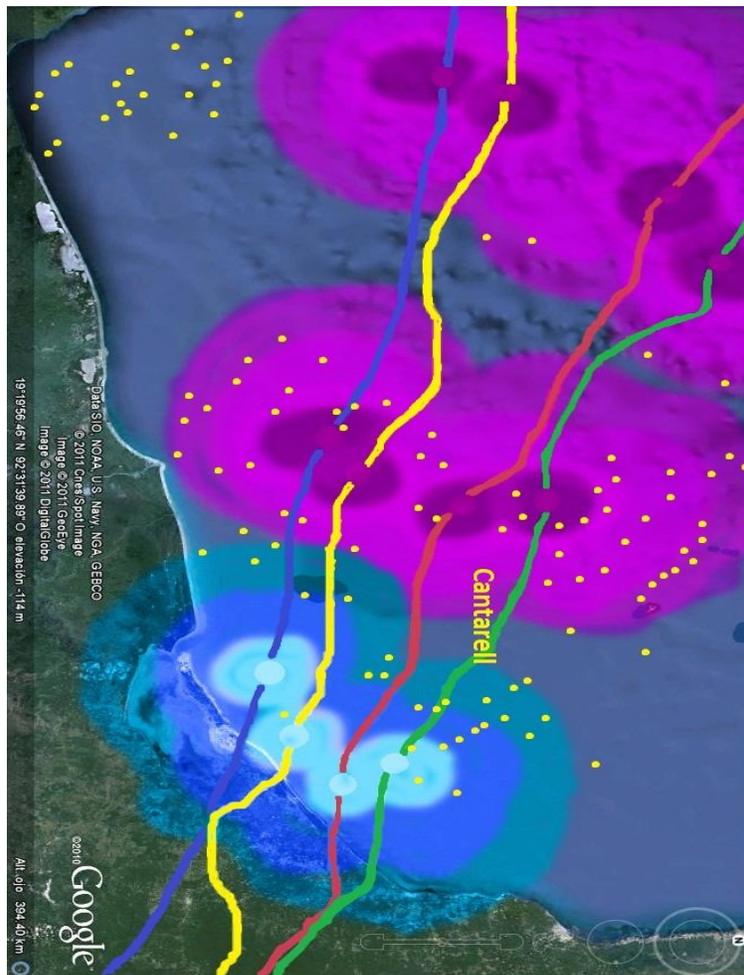


Figura 5.0. Vista integral del efecto de Dean a las instalaciones de PEMEX con múltiples simulaciones.

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones generales de la tesis en cuanto al modelo numérico, el sistema de predicción y al análisis de los resultados logrados. Se completa este capítulo señalando futuras líneas de investigación que se pueden llevar a cabo a partir del modelo y de los resultados de investigación obtenidos.

Al recrear los eventos que impactaron a las instalaciones de PEMEX por medio del modelo atmosférico WRF, se presentó los resultados arrojados por éste; de las seis simulaciones realizadas, las trayectorias pronosticadas sobre la región noroeste del país obtuvieron bastante incertidumbre en comparación de la registrada. Posiblemente los sistemas sinópticos de mesoescala que dirigen al huracán quedaron fuera de las condiciones de frontera del modelo, por lo que para casos futuros de pronóstico, se tiene que hacer un análisis con la dimensión apropiada del dominio (Caracas Uribe, Arturo, 2005).

El ensamble fue preciso en mantener una probabilidad alta para la presión a nivel del mar para los cinco días de pronóstico, como ocurrió en realidad. Las salidas del modelo, por ejemplo, la intensidad del viento simulada comparada con la registrada por la Boya Station 42906 fueron prácticamente lo mismo.

En la realización de la tesis como se comentó anteriormente se utilizaron datos de análisis globales del NARR para las condiciones de frontera lateral del modelo, es posible que la magnitud de los errores en la simulación se incrementaran, pero depende también, de la buena o mala representación que hagan los modelos globales para las regiones tropicales (Hausman, 2001).

Para el siguiente capítulo utilizando las ecuaciones creadas en el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) por Powell y Reinhold y haciendo uso de las herramientas que desarrolla esta organización fue posible la creación de un sistema de alerta temprana, con dicha aplicación se puede pronosticar el oleaje intenso, marejadas violentas o vientos intensos que afectan las estructuras de plataformas petroleras como de buques industriales, para el trabajo de esta tesis se uso factores generales en el daño de instalaciones pero dando una idea concisa del resultado posible.

La creación del sistema de alerta se plantea para la toma de decisiones futuras necesarias para proporcionar seguridad a las plataformas como a sus tripulantes de eventos meteorológicos extremos, basada en los criterios de Powell & Reinhold, Saffir-Simpson, y Dotzek se realizó la tabla 5.0. la cual, con solo conocer la velocidad del viento es posible encontrar las resultantes causantes del daño a las estructuras antes mencionadas.

La implementación de un sistema de prevención, a futuro permitiría anticipar amenazas significativas para las operaciones marinas y llevar a cabo la medidas necesarias para evitar catastrofes innecesarias en caso de huracanes o Nortes, evitando significativamente pérdidas de producción, económicas y sobretodo humanas, abarcando no solo a la industria petrolera también a más empresas prestadoras de servicios.

El uso de modelos atmosféricos representa una herramienta útil para la gestión ambiental, la exactitud de la simulación dependerá de la calidad en la toma de datos y su interacción con el ambiente, por lo que no basta con conocer el funcionamiento del modelo. Para hacer sus estimaciones los modelos incorporan gran cantidad de fórmulas matemáticas, basadas en fundamentos teóricos acerca del comportamiento de los fenómenos meteorológicos, y su interacción con el ambiente. Por lo que no basta con conocer el funcionamiento del modelo, sino que hay que familiarizarse con los conceptos teóricos que fundamentan las variables.

Existen gran variedad de modelos, adecuados a las diferentes condiciones del ambiente; es decir, el mismo uso de parámetros en la física no es siempre apropiado para todos los ambientes. Por lo tanto, la elección correcta de ecuaciones atmosféricas requerirá de buen criterio y conocimiento de los conceptos teóricos que fundamentan los algoritmos componentes del modelo, por parte del encargado del monitoreo ambiental.

Se pueden aplicar distintas técnicas con el uso del WRF. Por un lado el modo de pronóstico, realizando el control diariamente con una predicción para periodos cortos en horas. También la aplicación del modo histórico, para la predicción del impacto en las zonas industriales y conocer los problemas que se generaron a través del tiempo, realizando un historial de estos. En todos los casos en que se ha aplicado el sistema, se ha comprobado que los resultados son fiables.

El futuro en la investigación atmosférica para la industria petrolera costera es realizar predicciones de eventos meteorológicos extremos en tiempo real y analizar el impacto de las diversas fuentes emisoras, tanto estáticas como dinámicas. Estas predicciones podrían reducir los peligros, al conseguir adoptar las medidas más adecuadas para cada tipo de acontecimiento y para cada región concreta.

La habilidad para anticipar como cambiará el clima de un año a otro dará lugar a una mejor administración de la industria petrolera y otras. El mejoramiento de los modelos numéricos predictivos podría evolucionar el sistema océano-atmósfera en las próximas estaciones o años. Mediante la incorporación de predicciones climáticas dentro de las decisiones de manejo, la humanidad se está tornando más adaptada a los ritmos irregulares del clima y tener un control más acertado de estos eventos.

Se espera que esta tesis sea de utilidad a la industria petrolera, ya que conviene para sus intereses en general, el impacto meteorológico como se pudo analizar es de suma importancia y es algo que tiene que seguir en constante estudio.

ANEXO

A.1. Estadísticas meteorológicas del huracán Dean

La temperatura superficial del agua marina durante los días 18 y parte del 20 de agosto de 2007 se mantuvo fluctuando entre 30 °C y 29 °C a medida que el huracán “Dean” se acercaba al litoral oriental de Quintana Roo. Durante la noche del día 20 y las primeras horas del día 21 al pasar por el sur de la boya marina en la cuenca de Yucatán, se reflejó su influencia en los registros, al iniciar la disminución de la temperatura superficial media (TSM). Los dos días siguientes se mantuvo con variaciones que oscilaron entre 28.8 °C y 29.2 °C. Este comportamiento de la variación, puede atribuirse a la energía que sirvió para alimentarse espacialmente al fenómeno (Fig. A.1.).

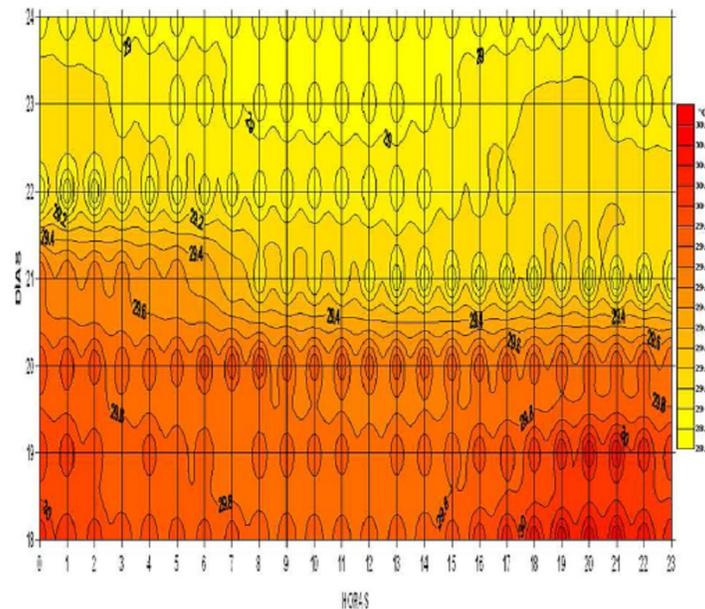


Figura A.1. Distribución horaria-diaría de la TSM registrada en la boya cuenca del Yucatán al paso del huracán Dean. (Fuente: Universidad Veracruzana)

La presión atmosférica comparada con la TSM tuvo un comportamiento más regular. El día 18 y hasta las primeras horas del 19 de agosto de 2007 los registros fueron entre 1013 y 1014 [hPa]. Este comportamiento comenzó a decaer paulatinamente a partir de las 10 A.M del mismo 19, manteniéndose hasta el día 20 y el día 21 a las 2:00 A.M la repercusiones de la trayectoria del huracán Dean se reflejaron al tenerse el mayor abatimiento de la presión atmosférica con un registro que fue de 1001.2 [hPa]. A partir de este registro, comenzó nuevamente a recuperarse al aumentar los siguientes días hasta restablecerse (Fig. A.2.). En la figura A.3. se muestra el desarrollo del huracán Dean con el paso del tiempo.

| Date/Time (UTC) | Ship/Buoy ID | Latitude (°N) | Longitude (°W) | Wind dir/speed (kt) | Pressure (mb) |
|-----------------|--------------|---------------|----------------|---------------------|---------------|
| 13 / 0000 | VRBL4 | 14.2 | 27.0 | 040 / 35 | 1010.0 |
| 16 / 1250 | 41040 | 14.5 | 53.0 | 120 / 41 | 1008.3 |
| 16 / 1900 | 41101 | 14.6 | 56.2 | 070 / 50 | 1003.0 |
| 17 / 0100 | 41100 | 15.9 | 57.9 | 080 / 35 | 1011.6 |
| 17 / 0600 | J8PB | 17.9 | 64.1 | 080 / 37 | 1015.0 |
| 18 / 0600 | C6FN4 | 18.0 | 64.8 | 100 / 39 | 1011.0 |
| 18 / 0941 | 42059 | 15.0 | 67.5 | 306 / 57 | 974.2 |
| 18 / 1800 | ELUC5 | 16.7 | 66.1 | 130 / 45 | 1010.2 |
| 20 / 0000 | DHER | 16.4 | 76.0 | 170 / 35 | 1006.0 |
| 20 / 0300 | C6FZ7 | 21.4 | 74.0 | 090 / 39 | 1015.0 |
| 20 / 0600 | DHER | 18.2 | 74.9 | 120 / 45 | 1010.8 |
| 20 / 2250 | 42056 | 19.9 | 85.1 | 071 / 52 | 1001.3 |
| 22 / 0931 | 42055 | 22.0 | 94.0 | 118 / 55 | 1001.2 |

Figura A.2. Selección de los buques y boyas fijas que dieron informes de los vientos del huracán Dean.. (Fuente: NOAA)

| Evolución del Huracán "Dean" | |
|---|---|
| Depresión Tropical | Agosto 13 (15 GMT) |
| Tormenta Tropical | Agosto 14 (15 GMT) |
| Huracán Categoría 1 | Agosto 16 (09 GMT) |
| Huracán Categoría 2 | Agosto 16 (21 GMT) |
| Huracán Categoría 3 | Agosto 17 (17 GMT) |
| Huracán Categoría 4 | Agosto 18 (00 GMT) |
| Huracán Categoría 5 | Agosto 21 (03 GMT) |
| Huracán Categoría 3 | Agosto 21 (12 GMT) |
| Huracán Categoría 2 | Agosto 21 (15 GMT) |
| Huracán Categoría 1 | Agosto 21 (18 GMT) |
| Huracán Categoría 2 | Agosto 22 (15 GMT) |
| Huracán Categoría 1 | Agosto 22 (18 GMT) |
| Tormenta Tropical | Agosto 22 (21 GMT) |
| Depresión Tropical | Agosto 23 (03 GMT) |
| Sistema de aviso de la CONAGUA-SMN Total de avisos difundidos: 64 | |
| Resumen del ciclón tropical | |
| Recorrido | 7,560 km |
| Duración | 228 horas |
| Intensidad máxima de vientos | 270 km/h (Ago 21; 09 GMT) |
| Presión mínima central | 906 hPa (Ago 21; 09 GMT) |
| Impactos en tierra | - Agosto 21 (08 GMT) Puerto Bravo, Quintana Roo con vientos de 260 km/h, rachas de 315 km/h en categoría V en la Escala Saffir-Simpson - Agosto 22 (17 GMT) Tecolutla, Veracruz, con vientos de 155 km/h, rachas de 195 km/h en categoría II en la Escala Saffir-Simpson |
| Estados afectados directamente | Quintana Roo, Campeche, Veracruz, Puebla, Hidalgo y Querétaro |
| Lluvia máxima reportada en 24 horas | 391 mm en Requetemu, San Luis Potosí Del 22 al 23 de agosto |

Figura A.3. Evolución del huracán Dean. (Fuente: Conagua)

A.2. Detalles individuales del huracán Dean

| ADV | LAT | LON | TIME | WIND | PR | STAT |
|-----|------|-------|-----------|------|-----|-------------|
| 25 | 16.6 | -73.4 | 08/19/09Z | 125 | 921 | HURRICANE-4 |
| 25A | 16.8 | -74.3 | 08/19/12Z | 125 | 921 | HURRICANE-4 |
| 26 | 17 | -75.1 | 08/19/15Z | 125 | 926 | HURRICANE-4 |
| 26A | 17.1 | -76 | 08/19/18Z | 125 | 930 | HURRICANE-4 |
| 27 | 17.3 | -76.8 | 08/19/21Z | 125 | 930 | HURRICANE-4 |
| 27A | 17.5 | -77.8 | 08/20/00Z | 125 | 930 | HURRICANE-4 |
| 28 | 17.6 | -78.8 | 08/20/03Z | 125 | 925 | HURRICANE-4 |
| 28A | 17.7 | -79.7 | 08/20/06Z | 130 | 926 | HURRICANE-4 |
| 29 | 17.7 | -80.7 | 08/20/09Z | 130 | 926 | HURRICANE-4 |
| 29A | 17.8 | -81.5 | 08/20/12Z | 130 | 926 | HURRICANE-4 |
| 30 | 17.9 | -82.4 | 08/20/15Z | 130 | 925 | HURRICANE-4 |
| 30A | 18 | -83.2 | 08/20/18Z | 130 | 924 | HURRICANE-4 |
| 31 | 18.2 | -84.2 | 08/20/21Z | 130 | 918 | HURRICANE-4 |
| 31A | 18.2 | -85.1 | 08/21/00Z | 135 | 915 | HURRICANE-4 |
| 32 | 18.4 | -86 | 08/21/03Z | 140 | 914 | HURRICANE-5 |
| 32A | 18.5 | -86.8 | 08/21/06Z | 140 | 911 | HURRICANE-5 |
| 33 | 18.7 | -87.8 | 08/21/09Z | 145 | 906 | HURRICANE-5 |
| 33A | 18.9 | -88.7 | 08/21/12Z | 110 | 935 | HURRICANE-3 |
| 34 | 19 | -89.6 | 08/21/15Z | 90 | 950 | HURRICANE-2 |
| 34A | 19.2 | -90.4 | 08/21/18Z | 75 | 960 | HURRICANE-1 |
| 35 | 19.4 | -91.3 | 08/21/21Z | 70 | 970 | HURRICANE-1 |
| 35A | 19.7 | -92.2 | 08/22/00Z | 70 | 970 | HURRICANE-1 |
| 36 | 19.9 | -93 | 08/22/03Z | 70 | 979 | HURRICANE-1 |
| 36A | 20.1 | -94 | 08/22/06Z | 70 | 980 | HURRICANE-1 |
| 37 | 20.3 | -94.8 | 08/22/09Z | 70 | 979 | HURRICANE-1 |
| 37A | 20.5 | -95.5 | 08/22/12Z | 80 | 976 | HURRICANE-1 |
| 38 | 20.6 | -96.3 | 08/22/15Z | 85 | 979 | HURRICANE-2 |
| 38A | 20.5 | -97.3 | 08/22/18Z | 75 | 982 | HURRICANE-1 |
| 39 | 20.5 | -98.1 | 08/22/21Z | 60 | 975 | TROPICAL |
| 39A | 20.5 | -99 | 08/23/00Z | 40 | 996 | TROPICAL |

Tabla A.1. Trayectoria del huracán Dean. (Fuente: NOAA)

A.3. Estadísticas meteorológicas del Frente Frío No. 4

El 23 de octubre, el Frente Frío no. 4 azotó la región suroeste del Golfo de México con una fuerza de temporal (“gale” en la escala Beaufort) a tormenta que afectó el área del Litoral en Tabasco en la madrugada del 23 de octubre del 2007. Los boletines meteorológicos de la CONAGUA a las 07:00 horas y del Control Marino a las 08:00 horas emitidos indicaron que las condiciones generales fueron normales con vientos al noroeste de 9.72 a 11.11 [m/s] y olas desde los 1.22 hasta los 1.52 [m] de

altura. Se desarrolló condiciones malas para las operaciones en la Sonda de Campeche por el Frente Frío no. 4, continuó desplazándose por la vertiente del Golfo de México, extendiéndose desde el este de los Estados Unidos hacia el sur de Veracruz. La intensa masa de aire frío generó viento intensos de 23.61 a 26.39 [m/s] con rachas superiores a los 27.77 [m/s], olas de 4.2 a 4.8 metros. (Fig. A.4.)

Las condiciones predichas por el pronóstico, fueron experimentadas en el área donde se encontraba la Usumacinta, aproximadamente a 18 [km] al norte de Frontera, Tabasco. Durante la mañana del 23 de octubre, se realizaron preparativos en la plataforma Usumacinta para asegurar material suelto en la cubierta y preparándose para soportar la tormenta. Los siguientes puertos fueron cerrados a la navegación para todo tipo de embarcación: Coatzacoalcos a las 03:00 horas, Dos Bocas a las 05:30 horas, y Ciudad del Carmen a las 07:00 horas. Control Aéreo suspendió indefinidamente todos los vuelos saliendo de Ciudad del Carmen.

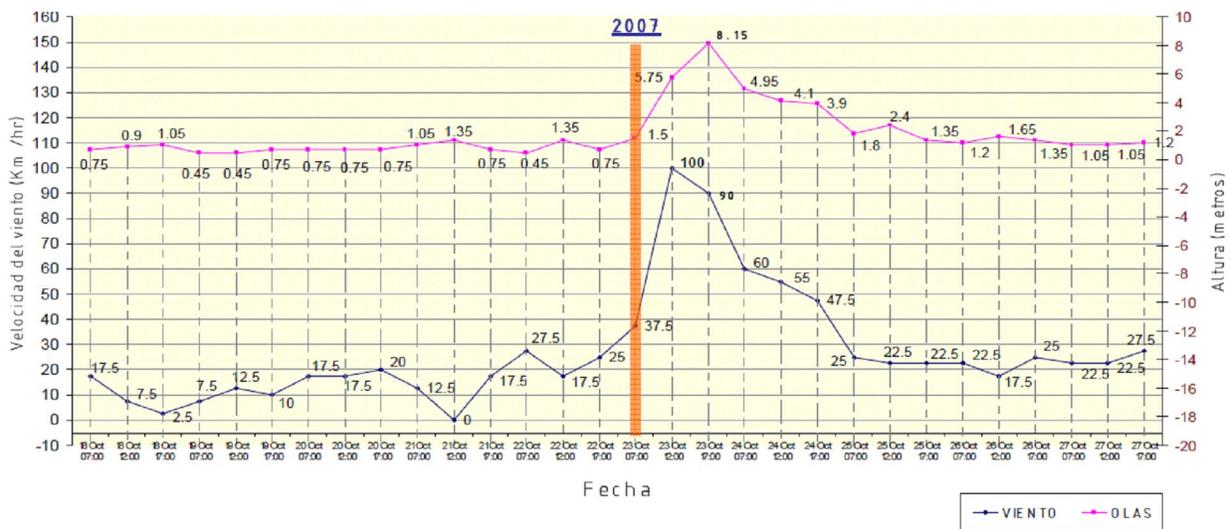


Figura A.4. Historial de vientos y oleaje antes y después del incidente. (Fuente: Battelle’s Energy Systems)

La estimación de las condiciones meteorológicas mar adentro fue elaborada por dos empresas meteorológicas que se especializan en el Golfo de México: Wilkens Weather Technologies y Oceanweather, Inc. Las técnicas empleadas para generar las estimaciones de condiciones meteorológicas históricas “hindcast” incluyen el análisis estadístico y modelación numérica de los datos capturados por instrumentos de medición instalados en boyas, naves y estaciones meteorológicas. La diferencia más notable entre las dos estimaciones históricas ésta relacionada con la resolución temporal. Oceanweather, Inc., calcula las condiciones históricas cada 30 minutos mientras que Wilkens Weather Technologies lo hace cada tres horas (Brian Leis, Brain; Chidester, Richard; Flamberg; Stephanie et al, 2007).

Las figuras A.5. y A.6. presentan las condiciones máximas respecto a los vientos, el oleaje y las corrientes estimadas por ambas empresas. La altura del oleaje iba de 6.71 a 7.60 [m], con la altura máxima del oleaje entre 10.97 y 12.42 [m]. La estimación elaborada por Oceanweather, Inc., tiende a atribuir cifras mayores con

respecto tanto a la velocidad del viento como a la altura del oleaje porque la mayor resolución temporal de su estudio capta mejor las condiciones pico del evento.

| Pronóstico retrospectivo de Wilkens Weather | |
|---|-------|
| Altura máxima de una ola importante (pies) | 22 |
| Altura máxima de una ola importante (m) | 6.71 |
| Altura máxima de la ola (pies) | 36 |
| Altura máxima de la ola (m) | 10.97 |
| Viento máximo sostenido (kts) | 46 |
| Ráfagas de viento máximas (kts) | 69 |

Figura A.5. Estimación de las condiciones máximas en el área de la Usumacinta el 23 de octubre del 2007 (Fuente: Wilkens Weather Technologies)

| OceanWeather | |
|--|---------|
| Altura máxima de una ola importante (pies) | 24.93 |
| Altura máxima de una ola importante (m) | 7.60 |
| Altura máxima de la ola (pies) | 40.80 |
| Altura máxima de la ola (m) | 12.42 |
| Viento sostenido máximo (m/s) | 21.51 |
| Viento sostenido máximo (kts) | 41.43 |
| Ráfagas de viento máximas (ms) | 62.5941 |
| Corriente máxima (ms) | 0.494 |

Figura A.6. Estimación de las condiciones máximas en el área de la Usumacinta el 23 de octubre del 2007 (Fuente: OceanWeather, INC.)

Se aprecia en la figura A.8. el desarrollo de la catástrofe y la incorrecta evacuación del personal de la plataforma Usumacinta durante lo más crítico de la tormenta ya que las condiciones se caracterizaban por una altura significativa del oleaje de 7.6 [m] y vientos sostenidos de 21.39 [m/s]. La Usumacinta experimentó tres modalidades de movimiento el día del incidente (algunas después del abandono de la plataforma). Las fotografías de la Usumacinta tomadas antes y después del incidente muestran el alcance del desplazamiento. (Fig. A.7.)

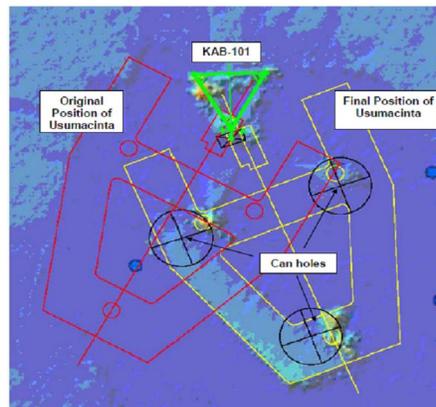


Figura A.8. Posición de la Usumacinta antes y después del incidente. (Fuente: PEMEX)

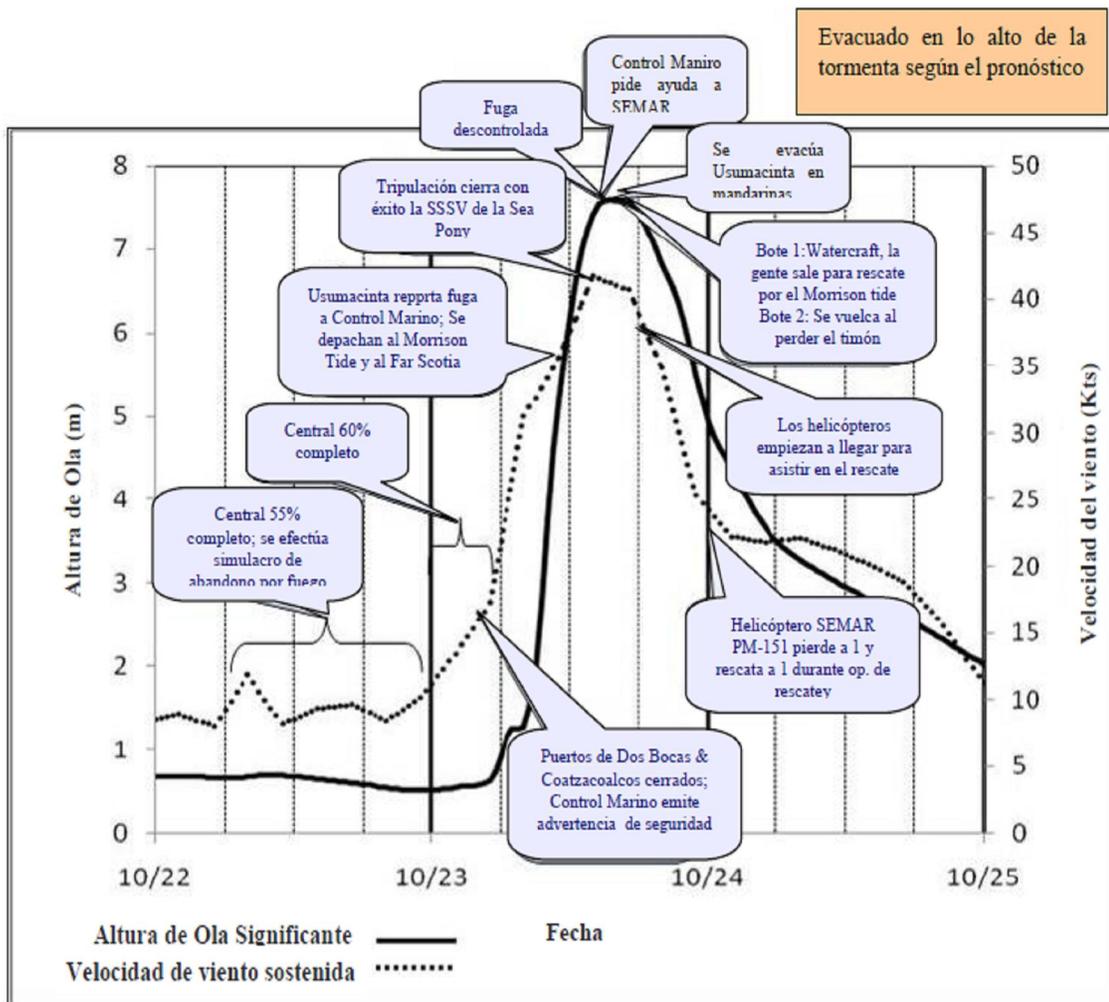


Figura A.7. Historial de vientos y oleaje antes y después del incidente. (Fuente: PEMEX)

A.4. Detalles individuales del Frente Frío No. 4

| #YY | MM | DD | hh | WDIR | WSPD | GST | WVHT | DPD | APD | PRES | ATMP | WTMP | DEWP |
|------|----|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| #yr | mo | dy | hr | degT | m/s | m/s | m | sec | sec | hPa | degC | degC | degC |
| 2007 | 10 | 23 | 0 | 344 | 18.2 | 21.7 | 2.63 | 6.25 | 5.2 | 1012 | 23.8 | 28.1 | 23.3 |
| 2007 | 10 | 23 | 1 | 342 | 19.2 | 23 | 3.31 | 7.69 | 5.87 | 1013 | 24.1 | 28.1 | 21.5 |
| 2007 | 10 | 23 | 2 | 345 | 17.6 | 21.6 | 3.6 | 7.69 | 5.86 | 1015 | 23.9 | 28.2 | 21 |
| 2007 | 10 | 23 | 3 | 343 | 17.3 | 20.8 | 99 | 99 | 99 | 1016 | 23.7 | 28.1 | 19.4 |
| 2007 | 10 | 23 | 4 | 344 | 19 | 23.4 | 5.41 | 10 | 7.23 | 1015 | 23.2 | 28.1 | 18.7 |
| 2007 | 10 | 23 | 5 | 345 | 17.8 | 21.8 | 99 | 99 | 99 | 1017 | 22.9 | 28.1 | 17.9 |
| 2007 | 10 | 23 | 6 | 343 | 16.1 | 20.8 | 99 | 99 | 99 | 1017 | 22.9 | 28 | 17.4 |
| 2007 | 10 | 23 | 7 | 343 | 17.3 | 99 | 99 | 99 | 99 | 1017 | 22.4 | 28 | 17.2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|----|----|----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2007 | 10 | 23 | 8 | 338 | 18.3 | 22.7 | 99 | 99 | 99 | 1016 | 22 | 27.9 | 16.8 |
| 2007 | 10 | 23 | 9 | 341 | 17.3 | 21.4 | 5.01 | 10.8 | 7.23 | 1016 | 21.9 | 27.8 | 16.3 |
| 2007 | 10 | 23 | 10 | 343 | 15.9 | 19.4 | 4.96 | 10.8 | 7.38 | 1017 | 21.8 | 27.8 | 15.4 |
| 2007 | 10 | 23 | 11 | 343 | 16.4 | 19.9 | 5.17 | 10.8 | 7.51 | 1018 | 21.9 | 27.8 | 15.7 |
| 2007 | 10 | 23 | 12 | 337 | 16.4 | 19.2 | 99 | 99 | 99 | 1019 | 21.7 | 27.8 | 14.8 |
| 2007 | 10 | 23 | 13 | 340 | 16.7 | 20.4 | 5.23 | 10.8 | 7.81 | 1020 | 21.4 | 27.7 | 14.6 |
| 2007 | 10 | 23 | 15 | 342 | 16.1 | 19.8 | 4.9 | 10.8 | 7.66 | 1021 | 21.4 | 27.6 | 14 |
| 2007 | 10 | 23 | 16 | 341 | 15.7 | 19.8 | 99 | 99 | 99 | 1021 | 21.2 | 27.5 | 13.7 |
| 2007 | 10 | 23 | 17 | 343 | 14.9 | 17.8 | 4.79 | 11.4 | 7.89 | 1022 | 21.4 | 27.4 | 13.3 |
| 2007 | 10 | 23 | 19 | 336 | 13.4 | 17.1 | 4.92 | 11.4 | 7.92 | 1021 | 21.2 | 27.3 | 13 |
| 2007 | 10 | 23 | 20 | 329 | 13.6 | 99 | 99 | 99 | 99 | 9999 | 999 | 999 | 999 |
| 2007 | 10 | 23 | 21 | 321 | 13 | 16.5 | 99 | 99 | 99 | 1019 | 21.3 | 27.2 | 12.6 |
| 2007 | 10 | 23 | 22 | 330 | 12.7 | 17.3 | 99 | 99 | 99 | 1019 | 21.2 | 27.2 | 12.3 |
| 2007 | 10 | 23 | 23 | 330 | 13 | 16.3 | 99 | 99 | 99 | 1019 | 21.5 | 27.1 | 12.4 |

Tabla A.2. Anotaciones de la trayectoria del Frente Frío No. 4 el día del incidente.
(Fuente: NOAA)

A.5. Clasificación de los modelos atmosféricos

Los modelos atmosféricos pueden clasificarse de diferentes maneras de acuerdo con el criterio que se tome como referencia y se clasifican en la siguiente tabla:

| Modelo | Dominio típico | Resolución típica |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Microescala | 200 x 200 x 100 m | 5 m |
| Mesoescala (urbano) | 100 x 100 x 5 km | 2 km |
| Regional | 1000 x 1000 x 10 km | 20 km |
| Sinóptico (continental) | 3000 x 3000 x 20 km | 80 km |
| Global | 65,000 x 65,000 x 20 km | 5° x 5° |

Tabla A.3. Modelos atmosféricos de acuerdo con su escala espacial. (Fuente: Seinfeld y Pandis)

BIBLIOGRAFÍA

- Anthes, Richard A., “Tropical Cyclones; Their evolution, structure & effects” American Meteorological Society, Vol 19, 1982.
- Brian Leis, Brian; Chidester, Richard; Flamberg; Stephanie et al, “Informe Battelle Energy Systems del caso Usumacinta PEMEX”, Battelle Energy Systems, 2007.
- Breña, Agustín, “Precipitación y recursos hidráulicos en México” Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.
- Bunya et al, “A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model Development and Validation”, NOAA & American Meteorological Society, 2009.
- Caballero, G., J. M., “Predictibilidad de nortes en aguas mexicanas”. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 89 pp, 2005.
- Caetano Neto, Ernesto, “Cambio climático y su relación al sector energético”, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
- Caracas Uribe, Arturo, “Pronósticos probabilístico de los huracanes cercanos a México”, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.
- Castro, M., González, R. y Portela. A, “Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico”, Dpto. Geofísica y Meteorología, Universidad Complutense de Madrid, España, 1991.
- Climate Prediction Center, “El niño y southern oscillation”, NOAA, 2011.
- Dotzek, N., “Derivation of physically motivated wind speed scales”. Atmos. Res. 93, 564–574, 2009.
- G. N. Kariniotakis et al., “What performance can be expected by short-term wind power prediction models depending on site characteristics?”, Proceedings European Wind Energy Conference, Atenas, 4p, 2006.
- García Concepción, Omar, “¿Tiempo y Clima?”, Universidad de Guadalajara, 2007.
- Gilliam, Robert, Pleim, Jonathan & Xiu, Aijun, “Implementation of the Pleim-Xiu Land Surface Model and Asymmetric Convective Model in the WRF Model”, NOAA, National Centers for Environmental Prediction, 2003.

- Gilliland, Erin K. & Rowe, Clinton M, “A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model”, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, 2007.
- Goering, Melissa, “MRF Boundary Layer parameterization”, Atmo 595e, 2004.
- Gray, William M., “The mutual variation of wind, shear and baroclinicity in the cumulus convective atmosphere of the hurricane”, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, 1967.
- H. Morrison, J. A. Curry & V. I. Khvorostyanov, “A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models”, Department of Aerospace Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 2004.
- Hernández Unzón, Alberto, “Reseña del Huracán Dean del Océano Atlántico”, Subdirección General Técnica, Servicio Meteorológico Nacional.
- Hong, Song-You & Lim, Jeong-Ock, “The WRF single moment 6-class microphysics scheme WMS6”, Global Environment Laboratory, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 2006.
- Hu, H. “The relationship between atmospheric water vapor and temperature in simulations of climate change”, NCAR, 2000.
- Orlanski, “A rational subdivision of scales for atmospheric processes”, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 56, 527-530, 1975.
- J. M. Gutiérrez, R. Cano, A. S. Cofiño, C. M. Sordo, “Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas”, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2004.
- J. S. Armstrong, “Principles of forecasting: a handbook for researchers and practitioners”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
- J. T. M. Lenaerts et al, “Simulación idealizada de convección somera sobre tierra”, Departamento de Meteorología y Calidad del Aire, Wageningen University and Research Center, The Netherlands, 2009.
- Kain, John S., “The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update”, Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma, 2004.
- L. Franklin, James, “Tropical Cyclone Report Hurricane Dean”, NOAA, 2008.
- Landa R, V. Magaña y C. Neri, “Agua y Clima: Elementos para la adaptación al cambio climático”, Ed. Semarnat, 135 p, 2008.
- Lahoud, Gustavo, “Una visión integral de los recursos naturales”, Centro Argentino de Estudios Internacionales, 2006.

- Leggett, Jeremy, “El calentamiento del Planeta; Informe de Greenpeace”, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, 1999.
- López Méndez, J. Valentín, “Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco”, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- Lorenz, Edward, “Does the Flap of a Butterfly’s Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas”, MIT, 1972.
- Magaña, Víctor, “Los Impactos del Niño en México”. México: UNAM CONACYT, 1993.
- Moeng, Chin-Hoh, “Examining the nesting-LES capability using the WRF model”, NCAR, Boulder, CO, 2006.
- O. Lahoud, Gustavo, “Una visión integral de los Recursos Naturales”, Centro de Investigaciones Científicas y Técnicas (CLICeT), 2006.
- Observatorio de políticas públicas, “El rol del estado en emergencia por catástrofes”, diciembre 2006.
- Olson, Joseph B, “A comparison of two Mellor-Yamada-Based PBL schemes in simulating a hybrid barrier jet”, BNOAA/ESRL/GSD and National Research Council, Boulder, CO, 2009.
- Ospital, Carlos et al, “El Rol del estado en emergencias por catástrofes”, Observatorio de Políticas Públicas del Cuerpo de Administradores Gubernamentales de la Jefatura de Gabinete de Ministros, 2006.
- Pielke, R. A., “Mesoscale meteorological modeling”, Academic Press, 2nd Edition, Vol. 78, 2001.
- Polo Sánchez, Irene, Losada Doval, Teresa y Rodríguez de Fonseca, Belem, “La variabilidad del Atlántico tropical y su teleconexión extra-tropical”, Departamento de Física de la Tierra I (Geofísica y Meteorología), Universidad Complutense de Madrid, 2004.
- Powell, Mark D. & Reinhold, Timothy A, “Tropical cyclone destructive potential by Intregated Kinetic Energy”, American Meteorological Society, 2007.
- R. Daley, “Atmospheric data analysis”, Cambridge University Press, Cambridge, 1999. Anthes, Richard A., “Tropical Cyclones; Their evolution, structure & effects” American Meteorological Society, Vol 19, 1982.

- Rogers, E., T. Black, B. Ferrier, Y. Lin, D. Parrish y G. DiMego, “ Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis”, NWS Technical Procedures Bulletin, 2007.
- S. A. DeLurgio, “Forecasting principles and applications”, McGraw-Hill, Singapur, 1998.
- S. M. N., “Reseña del intense frente frio número 4 en base a las notificaciones oficiales emitidas por el SMN”, Servicio Meteorológico Nacional, 2007.
- S. S. Vaidya & S. S. Singh, “Applying the Betts–Miller–Janjic Scheme of Convection in Prediction of the Indian Monsoon”, Indian Institute of Tropical Meteorology, Pune, India, 2000
- Schumacher, Russ, “The Purdue Lin Microphysics Scheme in WRF”, AT 730, Final Proyect, 2006.
- Segura Curi, Berlin Aveles, “Evaluación del esquema de radiación de onda larga usado en el modelo” Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Instituto Geofísico del Perú, 2002.
- T. G. Doeswijk, K.J. Keesman, “Adaptive weather forecasting using local meteorological information”, Biosystems Engineering, Vol. 91, no. 4, 421-431, 2005.
- Tastula, Esa-Matti, “WRF model experiments on the Antartic atmosphere in winter”, University of Helsinki, 2004.
- Vázquez Aguirre, Jorge L, “Caracterización objetiva de los nortes del Golfo de México y su variabilidad interanual”, Tesis de licenciatura, Universidad Veracruzana, 1999.
- Vehvillainen, Bertel, “Physically-Based snow-cover model”, Hydrological Office, Water and Environment Research Institute, National Board of Waters and the Environment, 1990.
- Willian D. Hall, Roy M. Rasmussen & Gregory Thompson, “The new Thompson microphysical scheme in WRF”, NCAR, 2005.
- Wypych, Sebastian et al, “Enviromental science published for everybody round the Earth”, Espere Climate Encyclopaedia, 2003.
- Y. G. Perivolaris, A. N. Vougiouka, V. V. Alafouzos, D. G. Mourikis, V. P. Zagorakis, K. G. Rados, D.S. Barkouta, A. Zervos, Q. Wang, “Coupling of a mesoscale atmospheric prediction system with a CFD microclimatic model for production forecasting of wind farms in complex terrain: test case in the island of Evia”, Proceedings European Wind Energy Conference, Atenas, 10p, 2006.