

Contenido

1.DATOS GENERALES.....	2
2.RESUMEN DEL PROYECTO.....	2
3.RESULTADOS DE LA INVESTIGACION.....	3
3.1 Metas y objetivos alcanzados	3
3.2 Contribución técnica del proyecto.....	3
3.3 Productos de la investigación	4
3.4 Formación de recursos humanos.....	4
3.5 Colaboración interinstitucional y multidisciplinaria	4
3.6 Grupo de Trabajo	4
4. IMPACTO DE LA INVESTIGACION EN LOS SECTORES USUARIOS.....	5
4.1 Productos de la investigación y su transferencia a los usuarios.....	5
4.2 Mecanismos de transferencia utilizados	5
4.3 Beneficio potencial del proyecto	5
4.4 Observaciones a la evaluación de los usuarios.....	5
5. APLICACION DE LOS RECURSOS FINANCIEROS	5
5.1 Resumen financiero	5
5.2 Resumen de aportaciones complementarias	6
6. RECOMENDACIONES.....	6
6.1 Para la implantación de las acciones derivadas de la investigación.....	6
6.2 Para la difusión de los resultados	6
7. ANEXOS	6
Anexo 1 Desarrollo de la investigación	6
Anexo 2 Resúmenes Financieros (se adjunta formato)	6
Anexo 3 Productos generados e información de soporte	6
Anexo 4 Evaluación de los usuarios (en caso de aplicar).....	6
Anexo 5 Ficha Técnica (se adjunta formato).....	6

1. DATOS GENERALES

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE FONDOS MIXTOS CNA-CONACYT
"CNA-2006-01-48639".

Título:

UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN
POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO"

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Responsable técnico: Dr. José Antonio Salinas Prieto.

Tel. (777) 329 36 00 ext. 827

jsalinas@tlaloc.imta.mx

Fecha de elaboración: Mayo 2010

2. RESUMEN DEL PROYECTO

Para desarrollar este proyecto, se conformó un grupo de trabajo con investigadores del IMTA, del Instituto de Ingeniería UNAM y EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche para identificar y caracterizar las zonas costeras de México en peligro de inundación por marea de tormenta. Se utilizaron los modelos HURAC y MATO, del instituto de ingeniería de la UNAM, los cuales han sido validados en múltiples ocasiones para el litoral mexicano.

Se identificaron en bases de datos de 1949 a 2006, las direcciones e intensidades posibles de acuerdo a las trayectorias históricas, con esta información se realizaron simulaciones numéricas de marea de tormenta utilizando campo de viento "tipo" de acuerdo a las trayectorias e intensidades históricas identificadas.

Para incorporar como condiciones de frontera en el fondo, la batimetría de las zonas costeras se obtuvo de las cartas de la Secretaría de la Marina y la topografía costera de INEGI, generando una base de datos de batimetría unificada para ser utilizada como condiciones de frontera en las simulaciones de marea de tormenta. Se diagnosticaron las trayectorias e intensidades históricas de ciclones que afectaron México para evaluar las diferentes condiciones atmosféricas posibles para identificar casos "tipo", de estudio para simular escenarios de inundación costera.

Se realizaron simulaciones numéricas de la sobre elevación costera asociada a condiciones atmosféricas "tipo" utilizando direcciones e intensidades observadas, ello incorporando datos de batimetría y topografía como condiciones de frontera de fondo. Se muestran ejemplos de resultados relevantes, así como la estructura de la página WEB de despliegue de simulaciones bajo diferentes casos de dirección e intensidad de viento. Adicionalmente, se entrega información digital

tanto del relieve utilizado como del sistema maneja en plataforma WEB bajo sistema operativo Windows.

El despliegue de resultados se programó para realizarse de manera amigable a través de un sistema de consulta WEB dinámico en que se muestran las zonas en peligro de inundación en función de la intensidad y ángulo de incidencia de viento, información generada de análisis exhaustivos tanto de trayectorias como de intensidades históricas de ciclones tropicales, para generara escenarios típicos que se han observado en la históricamente.

3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

3.1 Metas y objetivos alcanzados

4.1 Integrar una base de datos de batimetría y topografía costera mexicana mediante la captura y digitalización a partir de las bases de datos de la Secretaría de Marina y de imágenes de satélite Quickbird y un modelo digital del terreno.

4.2 Adaptar el modelo numérico de marea de tormenta MATO (IINGEN-UNAM) con esquema de inundación y secado de celdas utilizando la información de batimetría y topografía integrada.

4.3 Análisis de trayectorias e intensidades históricas de ciclones que afectaron México, desde 1949 a 2007 para el Pacífico Este y de 1851 a 2007 para el Atlántico, identificando casos de estudio para simular escenarios de inundación costera.

4.4 Simulación numérica y graficado masivo de los efectos en marea de tormenta de los casos de estudio seleccionados, los cuales se sintetizan en seis intensidades de viento (63 Km/h, 90 Km/h, 108 Km/h, 126 Km/h, 144 Km/h y 155 Km/h) para nueve direcciones (procedencia del viento): Este: 180°, Este Noreste: 202.5°, Noreste: 225°, Norte Noreste: 247.5°, Norte: 270 °, Norte Noroeste: 292.5 °, Noroeste: 315°, Oeste Noroeste: 337.5° y Oeste 360 °, actuando en las costas de la República Mexicana. Las mallas se generaron para tres grandes regiones: Golfo de México, Caribe Mexicano y Océano Pacífico del Este (costas mexicanas).

4.5 Desarrollo e implementación de un sistema de consulta dinámico de resultados a través de una página WEB.

3.2 Contribución técnica del proyecto

Implementación de un modelo numérico de simulación de sobre-elevación del nivel del mar asociado al efecto de ciclones tropicales como herramienta de diagnóstico.

Identificación de la respuesta dinámica del océano al forzamiento atmosférico local, asociado a ciclones tropicales.

Diagnóstico del efecto de la batimetría en el comportamiento dinámico del océano.

Avance en la identificación de zonas costeras mexicanas susceptibles de inundación bajo diferentes escenarios de intensidad, dirección y duración de vientos asociados a ciclones tropicales.

El material generado se ha preparado para su presentación en congresos internacionales.

3.3 Productos de la investigación

Base de datos de simulaciones numéricas para diferentes intensidades y direcciones de viento.

Sistema de consulta dinámico e interactivo accesible en página WEB de acceso restringido, este sistema será entregado a los usuarios finales.

3.4 Formación de recursos humanos

Estancia Posdoctoral del Dr. Gregorio Posada Vanegas, quien recientemente fue contratado como investigador en Epomex- Universidad Autónoma de Campeche, continuando con ésta línea de investigación.

3.5 Colaboración interinstitucional y multidisciplinaria

Este proyecto fue realizado por tres instituciones de manera conjunta: el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) el Instituto de Ingeniería de la UNAM y EPOMEX, de la Universidad Autónoma de Campeche. El grado de colaboración de las tres instituciones fue equitativo, aprovechando el potencial de los recursos humanos y equipo de cada institución.

3.6 Grupo de Trabajo

El grupo de trabajo se mantuvo en lo general, siendo el único cambio el Responsable Técnico del Proyecto, ya que renunció al IMTA, CONACYT aprobó en su momento este cambio, el cual se realizó en octubre de 2008.

4. IMPACTO DE LA INVESTIGACION EN LOS SECTORES USUARIOS

4.1 Productos de la investigación y su transferencia a los usuarios

Se entregará al usuario final el sistema de consulta dinámico de resultados, el cual se basa en menús interactivos de acceso gráfico para usuarios sin experiencia en el tema. Este sistema se entregará en el número de copias (discos compactos) que sea necesario, el cual contendrá un sistema de instalación amigable y automatizado, sin requerir asistencia técnica durante la instalación, ya que contendrá un instructivo simple, realizándose la totalidad de la instalación mediante operaciones en menús simplificados y secuenciales.

4.2 Mecanismos de transferencia utilizados

Se entregará el sistema de consulta dinámico en discos compactos al usuario final, realizando una demostración de la instalación y uso del mismo.

Adicionalmente, se realizará una presentación donde se sintetizarán mediante diagramas de flujo y herramientas gráficas los procesos realizados durante el proyecto para obtener el producto que se entrega.

4.3 Beneficio potencial del proyecto

Como se ha demostrado en diversos estudios socio-económicos, anticiparse a los efectos potenciales de un evento extremo tanto proveniente del océano como de la atmósfera contiene un gran valor. Invertir en acciones de prevención provee una gran ganancia social en todos los aspectos, las ganancias económicas son difíciles de evaluar, pero invariablemente la inversión en prevención es mucho menor que las pérdidas económicas.

4.4 Observaciones a la evaluación de los usuarios

La transferencia de los productos se hará inmediatamente después de enviar este informe, quedando en espera de sus comentarios como usuarios.

5. APLICACION DE LOS RECURSOS FINANCIEROS

5.1 Resumen financiero

Se anexa la información financiera.

5.2 Resumen de aportaciones complementarias

No hubo aportaciones complementarias.

6. RECOMENDACIONES

6.1 Para la implantación de las acciones derivadas de la investigación

El correcto uso de los productos será mostrado al usuario final mediante una presentación donde se señalarán los alcances y limitaciones de los mismos, no obstante se sintetizan aquí:

Los escenarios mostrados de inundaciones como resultados son estimaciones basadas en simulaciones numéricas de marea de tormenta, por ello son aproximaciones, debiendo considerarlo en la toma de decisiones, ya que los modelos poseen incertidumbres intrínsecas, no obstante ello, los modelos numéricos son una extraordinaria herramienta que estima posibles impactos costeros, su apropiado uso se basa en reconocerlo como escenarios probables.

6.2 Para la difusión de los resultados

Servicio Meteorológico Nacional, Sistemas Nacionales y Estatales de Protección civil.

7. ANEXOS

Anexo 1 Desarrollo de la investigación

Informe detallado del desarrollo y resultados técnicos.

Anexo 2 Resúmenes Financieros

Anexo 3 Productos generados e información de soporte

Discos compactos conteniendo el sistema de consulta dinámico y un manual de instalación.

Anexo 4 Evaluación de los usuarios

Anexo 5 Ficha Técnica



INFORME FINAL DEL PROYECTO DE FONDOS MIXTOS CNA-CONACYT “CNA-2006-01-48639”.

“UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO”

Responsable técnico Dr. José Antonio Salinas Prieto (IMTA)
Tel. (777) 329 36 00 ext. 827
jsalinas@tlaloc.imta.mx

Participantes: Dr. Rodolfo Silva Casarín (IINGEN-UNAM)
Ing. María Eugenia Maya Magaña (IMTA)
Dr. Gregorio Posada Vanegas (EPOMEX-UAC)
Ing. Gerardo Durán Valdéz (IINGEN-UNAM)

Mayo 2010

Contenido

1.- Resumen.....	2
2.- Introducción.....	3
3. Antecedentes.....	5
4.- Objetivos y metas.....	6
5. - Metodología.....	7
5.1 Datos de batimetría.....	7
5.2 Revisión de las imágenes Quickbird.....	12
5.3 Revisión de los modelos digitales de elevación.....	14
5.4 Extracción de la línea de costa.....	17
5.5 Identificación de la cubierta vegetal.....	18
5.6 Datos de topografía.....	20
5.7 Descripción del modelo numérico de marea de tormenta.....	23
5.8 Modelo numérico Bidimensional.....	23
5.9 Modelo de generación de malla.....	33
5.10 Ejemplo de casos de aplicación.....	39
5.11 Validación de resultados para el modelo bidimensional.....	42
5.12 Base de datos de trayectorias e intensidad de huracanes.....	44
5.13 Programación en PHP de algoritmos para consulta interactiva en un servidor WEB.....	45
6. Resultados.....	46
6.1 Inundaciones.....	46
6.2 Datos de caudales de ríos del banco de datos Bandas.....	47
6.3 Batimetría mejorada.....	47
6.4 Adaptación del modelo numérico de Marea de Tormenta para incluir inundaciones.....	48
6.5 Identificación de huracanes para casos de estudio.....	48
6.6 Validación del modelo HURAC.....	60
6.7 Generación de una base de datos de vientos.....	61
6.8 Resultados de la aplicación del modelo de marea de tormenta.....	64
6.9 Despliegue de resultados dinámicamente en página WEB.....	73
6.10 Generación de mapas de zonas de inundación para cada zona costera y sus variantes en dirección e intensidad de viento.....	117
6.11 Descripción del sitio de consulta dinámico WEB.....	124
7. Conclusiones.....	130
8. Bibliografía.....	132

1.- Resumen

Para desarrollar este proyecto, se conformó un grupo de trabajo con investigadores del IMTA, del Instituto de Ingeniería UNAM y EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche para identificar y caracterizar las zonas costeras de México en peligro de inundación por marea de tormenta. Se utilizaron los modelos HURAC y MATO, del instituto de ingeniería de la UNAM, los cuales han sido validados en múltiples ocasiones para el litoral mexicano.

Se identificaron en bases de datos de 1949 a 2006, las direcciones e intensidades posibles de acuerdo a las trayectorias históricas, con esta información se realizaron simulaciones numéricas de marea de tormenta utilizando campo de viento "tipo" de acuerdo a las trayectorias e intensidades históricas identificadas.

Para incorporar como condiciones de frontera en el fondo, la batimetría de las zonas costeras se obtuvo de las cartas de la Secretaría de la Marina y la topografía costera de INEGI, generando una base de datos de batimetría unificada para ser utilizada como condiciones de frontera en las simulaciones de marea de tormenta. Se diagnosticaron las trayectorias e intensidades históricas de ciclones que afectaron México para evaluar las diferentes condiciones atmosféricas posibles para identificar casos "tipo", de estudio para simular escenarios de inundación costera.

Se realizaron simulaciones numéricas de la sobre elevación costera asociada a condiciones atmosféricas "tipo" utilizando direcciones e intensidades observadas, ello incorporando datos de batimetría y topografía como condiciones de frontera de fondo. Se muestran ejemplos de resultados relevantes, así como la estructura de la página WEB de despliegue de simulaciones bajo diferentes casos de dirección e intensidad de viento. Adicionalmente, se entrega información digital tanto del relieve utilizado como del sistema maneja en plataforma WEB bajo sistema operativo Windows.

El despliegue de resultados se programó para realizarse de manera amigable a través de un sistema de consulta WEB dinámico en que se muestran las zonas en peligro de inundación en función de la intensidad y ángulo de incidencia de viento, información generada de análisis exhaustivos tanto de trayectorias como de intensidades históricas de ciclones tropicales, para generara escenarios típicos que se han observado en la históricamente.

2.- Introducción

México es uno de los países más afectados por el paso de ciclones tropicales, tanto en el litoral del Pacífico del Este como del Golfo de México y Caribe, cada año estos sistemas tropicales generan daños por viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación, sin embargo no existen estudios unificados en criterios y metodologías que provean información a la sociedad en general y a los tomadores de decisiones acerca de pronósticos y diagnósticos confiables.

Los ciclones tropicales están asociados a bajas presiones atmosféricas y se forman en diversas longitudes de los trópicos. Aproximadamente el 75 % de los ciclones tropicales se desarrollan en el Hemisferio Norte.

La destrucción causada por ciclones tropicales en el Caribe y América Central ha sido una parte importante de la historia de estas regiones y lo seguirá siendo en el futuro. La combinación de los factores que caracterizan a los ciclones tropicales, tales como el oleaje, los fuertes vientos y principalmente la inundación por marea de tormenta (sobre-elevación de la superficie del mar) representan un gran peligro para los asentamientos humanos que se encuentran sobre la costa. Existen estadísticas que muestran que debido a las medidas de mitigación y prevención de desastres, se ha producido una reducción en los daños ocasionados, no obstante que se haya incrementado en forma muy notoria la población asentada en zonas vulnerables. Sin embargo, es mucho lo que queda por hacer para aumentar la capacidad de mitigación y prevención. Uno de los fenómenos que mayores pérdidas ocasiona un ciclón es la inundación de zonas costeras por marea de tormenta.

El análisis de riesgo por los efectos destructivos generados por huracanes en las zonas costeras, mantienen su importancia como diagnóstico para desarrollar un manejo integral de prevención de desastres, y así procurar el menor daño posible en la comunidad vulnerable. Se busca determinar el porcentaje de peligro que ocasiona la inundación asociada a la marea de tormenta generada por un ciclón tropical en sus diferentes categorías de la escala Saffir- Simpson, se desarrollo un análisis en conjunto con la vulnerabilidad física, social y la exposición de los bienes y personas que se encuentra en las costas del país.

La marea de tormenta es una onda de gravedad causada por el agua impulsada por tormentas, es forzada por gradientes de presión horizontal asociados a estos ciclones y por los vientos de la tormenta hacia la costa.

La marea de tormenta posee una escala espacial similar a la del ciclón tropical que la genera, su duración es de varias horas dependiendo del tamaño del ciclón y de la velocidad con la que éste viaja. En aguas profundas, el esfuerzo del viento de un ciclón genera rotación sobre el océano y la elevación del nivel del mar es pequeña

como respuesta a la baja presión en el centro del ciclón. Los efectos se magnifican al acercarse el ciclón a la costa. En aguas someras (plataforma continental) por conservación de la vorticidad potencial se genera una marcada divergencia en las corrientes y al interactuar con la batimetría local y con la costa, se amplifica sustancialmente la elevación del nivel del mar de modo que la afectación varía espacialmente aun dentro de la misma región.

La descripción de la marea de tormenta ha transitado por diversas etapas, generándose modelos numéricos que representan la dinámica en aguas profundas y costeras. Estos modelos numéricos consideran el intercambio de impulso del agua con la atmósfera a través del gradiente horizontal de presión y de la tensión del viento en superficie. La presión provoca oscilaciones mediante el efecto llamado de barómetro invertido, que es independiente de la profundidad del agua. En cambio, la influencia del viento es inversamente proporcional a la profundidad. Por esto, en aguas poco profundas predomina el efecto del viento, mientras que en aguas más profundas el efecto de las variaciones de presión puede ser dominante. Centrándose en el aumento del nivel del agua, Pore (1973) resume los factores que generan y modifican la onda de tormenta como:

El aumento del nivel del mar es generado por las dos componentes de la tensión del viento sobre la superficie del agua. Una componente se debe al viento que sopla perpendicularmente y hacia la costa, en la que la pendiente de la superficie es directamente proporcional a la tensión del viento e inversamente proporcional a la profundidad. La otra componente es el efecto del viento que sopla paralelamente a la costa, que genera una corriente en el mismo sentido. Debido a la rotación de la tierra, el agua se apila sobre la costa, si ésta se encuentra a la derecha de la corriente en el hemisferio norte.

La reducción de la presión atmosférica, que por el efecto de barómetro invertido, causa un aumento del nivel del agua en las áreas de baja presión.

El transporte de agua por oleaje cerca de la costa.

La modificación producida por la configuración de la costa y la batimetría, como convergencia o divergencia en bahías.

Dichos modelos se han convertido en importantes herramientas de predicción, caracterización y estudio de escenarios con determinada probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, su utilidad más relevante es la de proporcionar elementos básicos para la formulación de estrategias de mitigación de desastres. En años recientes, los modelos fundamentados en las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad promediados en la dirección vertical (ecuaciones de aguas someras), han tenido una amplia aplicación y aceptación como modelos de marea de tormenta, ya que adicional al cálculo de la sobre-elevación del nivel del mar, permiten determinar sus corrientes asociadas en zonas litorales.

El modelo de marea de tormenta que se implementó como herramienta de este proyecto, resuelve las ecuaciones de aguas someras en un esquema de volumen finito y requiere como datos de entrada: batimetría y topografía de la zona de estudio, factor de fricción de fondo, viscosidad del remolino, presión atmosférica e intensidad del viento en cada una de las celdas y para cada paso de tiempo. Para la evolución de un huracán determinado, las características del viento (dirección e intensidad) se calculan por medio del modelo Hydromet, y las presiones utilizando el modelo Bret model x, ambos publicados por Bretschneider (1990) y calibrados para las costas mexicanas por Silva et al. (2000). Debido a sus dimensiones (litoral mexicano) la discretización del dominio de interés requiere sistemas de mallado que satisfagan los requisitos de almacenar información con suficiente precisión y de reducir al mínimo el costo computacional. El problema principal que se debe resolver durante este proceso es la relación entre las características geométricas de la malla de cálculo y las del flujo, esto implica que bajo ciertas condiciones, será necesario contar con mallas adaptables tanto espacial como temporalmente. Dado lo anterior, se hace necesario el uso de mallas no-estructuradas, ya que éstas permiten aumentar la precisión en regiones de especial interés, como islas o la misma línea de costa, sin la obligación de reducir el número de celdas en todo el dominio. De esta forma se reduce el tiempo de cálculo y no se retiene información innecesaria. Dentro de las mallas no estructuradas, las de tipo jerárquico ofrecen la posibilidad de almacenar la información en un árbol de datos. Las mallas jerárquicas o quadtree están formadas de elementos cuadrados o rectangulares y son generadas a partir de una subdivisión recursiva de todo el dominio de análisis en la que cada subdivisión produce cuatro nuevos cuadriláteros. El modelo de marea de tormenta que se implementó está resuelto sobre una malla quadtree, con la ventaja de que la codificación del mismo permite su adaptación y re-generación en forma automática y en función de los criterios que el usuario defina para la refinación de la misma.

3. Antecedentes

El estudio de los efectos costeros asociados a ciclones tropicales tales como marea de tormenta, oleaje, viento y precipitación ha sido abordado desde los puntos de vista de océano, atmósfera e ingenieril.

La determinación de las magnitudes de los agentes marinos como el oleaje (altura, periodo y dirección), viento (velocidad y dirección) y sobre-elevación anómala del nivel del mar, es primordial en cualquier estudio o análisis de ingeniería costera, ya que estos condicionan los procesos de erosión, depositación, el comportamiento natural y

la forma geométrica de los sistemas litorales; de igual manera es relevante conocer las características del oleaje y viento cuando se diseñan, proyectan o construyen estructuras marinas en las costas. Debido a lo anterior, es deseable tener una base de datos en la que se muestren las variaciones de los diferentes estados del mar que existen en un lapso de tiempo (corto o extenso) y se presenten las modificaciones del comportamiento del mar a través del estudio de los regímenes medios y extremos de elevación del mar (oleaje, marea astronómica y de tormenta).

Desafortunadamente en México como en otros países de la región, es difícil encontrar bancos de datos o información confiable acerca de los regímenes de oleaje antes mencionados.

Las instituciones participantes en este proyecto poseen experiencia en el desarrollo de proyectos asociados a estos efectos que en ocasiones son destructivos, por una parte, el IINGEN-UNAM ha mantenido líneas de investigación asociadas a estos efectos costeros, el caso más relevante es la publicación del Atlas del Clima Marítimo de las Vertientes Atlántica Mexicana y Pacífica Mexicanas, desarrollando una metodología que utiliza dos modelos numéricos que han permitido caracterizar y construir este Atlas de Clima Marítimo para las aguas litorales de México, el cual se crea a partir del re-análisis de 60 años de datos de vientos y oleaje, esto desarrollado.

Por otra parte, el IMTA, desde hace más de 12 años ha desarrollado estudios, herramientas e información asociada a ciclones tropicales, como la asesoría en caso de emergencia por ciclones tropicales a través del sistema PACT-RN (Probabilidad de Alerta ante ciclones tropicales en la región Norte del Golfo de México), así como un sistema de simulación numérica de viento y oleaje acoplado un modelo atmosférico de mesoescala: modelo MM5, con dos de oleaje WAM para oleaje global y SWAN para oleaje local en un sistema anidado que describe la dinámica de oleaje tanto distante como local.

La integración de la experiencia de ambos grupos en este proyecto brinda nueva información acerca de las zonas en peligro de inundación bajo efectos de la marea de tormenta asociada a intensidades y direcciones sintetizadas en este estudio.

4.- Objetivos y metas

4.1 Integrar una base de datos de batimetría y topografía costera mexicana mediante la captura y digitalización a partir de las bases de datos de la Secretaría de Marina y de imágenes de satélite Quickbird y un modelo digital del terreno.

4.2 Adaptar el modelo numérico de marea de tormenta MATO (IINGEN-UNAM) con esquema de inundación y secado de celdas utilizando la información de batimetría y topografía integrada.

4.3 Análisis de trayectorias e intensidades históricas de ciclones que afectaron México, desde 1949 a 2007 para el Pacífico Este y de 1851 a 2007 para el Atlántico, identificando casos de estudio para simular escenarios de inundación costera.

4.4 Simulación numérica y graficada masivo de los efectos en marea de tormenta de los casos de estudio seleccionados, los cuales se sintetizan en seis intensidades de viento (63 Km/h, 90 Km/h, 108 Km/h, 126 Km/h, 144 Km/h y 155 Km/h) para nueve direcciones (procedencia del viento): Este: 180°, Este Noreste: 202.5°, Noreste: 225°, Norte Noreste: 247.5°, Norte: 270 °, Norte Noroeste: 292.5 °, Noroeste: 315°, Oeste Noroeste: 337.5° y Oeste 360 °, actuando en las costas de la República Mexicana. Las mallas se generaron para tres grandes regiones: Golfo de México, Caribe Mexicano y Océano Pacífico del Este (costas mexicanas).

4.5 Desarrollo e implementación de un sistema de consulta dinámico de resultados a través de una página WEB.

5. - Metodología

5.1 Datos de batimetría.

Para realizar las simulaciones numéricas, se realizó una búsqueda de bases de datos de topografía y batimetría de las zonas a analizar, ello para incorporarla como condiciones de frontera de fondo, para al modelo de marea de tormenta. Se ha demostrado que para mejorar la calidad de las simulaciones de marea de tormenta en la costa, es necesario incorporar una malla de batimetría de la más alta resolución espacial posible, ello para detectar las zonas potencialmente inundables y, por ende, las poblaciones con mayor afectación. De ahí la necesidad de obtener batimetría y topografía de buena calidad y alta resolución. Estos datos se obtuvieron a partir de la predisposición dinámica del relieve (interpretación de modelos digitales del terreno). La predisposición dinámica del relieve se refiere a la facilidad o inhibición que presenta el terreno ante la movilidad de escorrentías superficiales. Considera la delimitación de unidades del terreno con distintos grados de susceptibilidad a la inundación en función de los niveles de inhibición o incremento de la escorrentía. Éste factor es sumamente relevante sobre todo ante la ocurrencia de lluvias intensas y mareas de tormenta que

se concentran en periodos de tiempo cortos y en cuencas donde el balance natural entre la escorrentía y la infiltración se han alterado.

Los factores morfométricos más relevantes considerados son: 1) sistemas de cimas (susceptibilidad mínima a las inundaciones) y depresiones (susceptibilidad máxima a las inundaciones). 2) densidad de cauces urbanos revestidos. Asociada con el coeficiente de escurrimiento máximo se determina la densidad de cauces potenciales por unidad de área de ladera (calles pavimentadas). Este concepto es similar al de densidad de disección aplicado en cuencas hidrológicas no interceptadas. 3) geometría del relieve (pendientes cóncavas, convexas, rectas). A nivel nacional se ha observado que las inundaciones más relevantes por su magnitud (extensión territorial) e intensidad, están asociadas a cuencas endorreicas (niveles de base cóncavos), planicies fluviales (pendientes rectas) y planicies bajas cóncavas palustres o costeras. 4) pendientes (umbrales de la inclinación del terreno y rupturas de pendiente). Para las ciudades costeras se establecen dos grupos de pendientes en porcentaje: 20 y el 40%. Ambas resultado del arreglo fisiográfico entre la estructura geológica sub-regional y la evolución morfológica del relieve durante el cuaternario. 5) diferenciación de los tipos de cobertura urbana según sus características naturales y/o artificiales y su susceptibilidad a las inundaciones. Rugosidad u oposición de la cobertura a las escorrentías o la infiltración. La digitalización de batimetrías de puertos y zonas costeras utilizando las cartas náuticas publicadas en el año 2006 por la Secretaría de Marina y datos de la NOAA. Fotos satelitales del acervo de INEGI y/o Quickbird para diferenciar tipos de cobertura. Generación de coberturas geográficas digitales e impresas (sistema de información geográfica). Se compraron a la empresa MAPA (Merrick Advanced Photogrammetry of the Americas), subsidiaria de Digital Globe, 21 grupos de imágenes de satélite de igual cantidad de puertos y ciudades costeras de México. Cada uno de estos grupos está compuesto por una o varias imágenes (dependiendo del área que cubre la foto) en formato *.TIF, georeferenciadas, en color verdadero y con una resolución de 0.60 m. En total se compraron 950 km2.

No	Imagen	Vertiente
1	Paraíso	Atlántica
2	La Paz	Pacífica
3	Magallanes	Atlántica
4	Puerto Chiapas	Pacífica
5	Vallarta	Pacífica
6	Mazatlán	Pacífica
7	Manzanillo	Pacífica
8	Lázaro Cárdenas	Pacífica
9	Huatulco	Pacífica
10	Guaymas 2	Pacífica
11	Ensenada	Pacífica
12	Cabos	Pacífica
13	Acapulco	Pacífica

14	Progreso	Atlántica
15	Veracruz	Atlántica
16	Tuxpan	Atlántica
17	Tampico	Atlántica
18	Coatzacoalcos	Atlántica
19	Campeche	Atlántica
20	Altamira	Atlántica
21	Cancún	Atlántica

Tabla 1. Puertos de los cuales se tienen imágenes de satélite.

En las figuras 1, 2, 3 y 4 se muestran, dentro de la línea roja, las imágenes compradas de las ciudades de Acapulco, La Paz, Veracruz y Tuxpan



Figura 1. Mosaico de imágenes de satélite para Acapulco, Guerrero



Figura 2. Mosaico de imágenes de satélite para La Paz, Baja California



Figura 3. Mosaico de imágenes de satélite para Tuxpan, Veracruz



Figura 4. Mosaico de imágenes de satélite para Veracruz, Veracruz

5.2 Revisión de las imágenes Quickbird

Se verificó que el acceso a los archivos no presentara inconsistencias topológicas y se identificó el sistema de coordenadas de la imagen. Todas las imágenes fueron convertidas del formato Tiff a formato JP2000. Una de las ventajas es que este formato permite reducir hasta diez veces el espacio en disco para el almacenamiento de las imágenes y es compatible con los programas empleados para el análisis espacial

(ENVI, ERDAS y ARCGIS). Para cada ciudad habrá una carpeta que contendrá los archivos necesario para su análisis.

Imágenes Quikbird en formato JP2000

El DEM re proyectado a WGS84 UTM zona X y recortado de cada zona

Mapa de geomorfología del terreno: cobertura de pendientes en grados (con tamaño de celda de 24m)

La línea de costa de la ciudad

Mapa de cubierta vegetal ~ Mapa de escurrimiento

Se realizó una evaluación de las 21 ciudades que cuentan con imágenes QuickBird. Se anotó la superficie que cubren las imágenes a lo largo de la costa y si estas cubren en principio la cota de 3.5m hacia el continente en las ciudades del Pacífico y una cota de 1m para las ciudades del Atlántico. Para algunas áreas se observó que el modelo de elevación de terreno presenta valores de altura con cambios abruptos desplegados en trazos geométricos debidos probablemente a errores de la interpolación. A continuación se presenta la descripción de las 21 ciudades en términos de la información disponible para cada una (Cuadro 1).

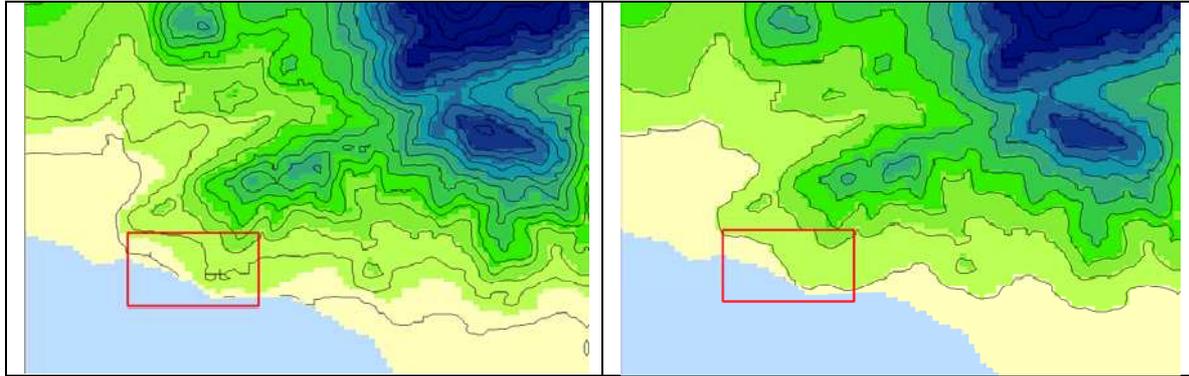
Cuadro 1. Evaluación de las capas de información de las ciudades de estudio

Ciudad	Estado	Superficie cubierta por QuikBird	Cubre cota 3.5m?	MDT
1	Acapulco	Guerrero	48km costa	si
2	Altamira	Tamaulipas	5km costa + 12km canal	si
Tampico	Tamaulipas	8km costa + 12km canal	si	Error 8-10m
3	Campeche	Campeche	17km costa	si
4	Cancún	Quitana Roo	Error	
Coatzacoalcos	Veracruz		Georeferencia	
Tuxpan	Veracruz	7km costa + 15km río	no	Error 1-5m
5	Veracruz	Veracruz	25km costa	si
6	Ensenada	Baja California	25km costa	si
7	Los Cabos	Baja California Sur	8.5km costa	si (cuadrada)

La Paz	Baja California Sur	10km costa	Si	Error 2-10m
8	Guaymas	Sonora	50km costa	No toda
9	Huatulco	Oaxaca	16km costa	si
10	Lázaro Cárdenas	Michoacán	17km costa + rios	si Error 5-20m
11	Manzanillo	Colima	35km costa	si
12	Mazatlán	Sinaloa	25km costa	si
13	Puerto Sánchez Magallanes?	Tabasco	7km costa	No 1m
Paraíso?	Tabasco	6km costa	No 1m	
14	Progreso	Yucatán	20km costa	No 1m Error 5-10m
15	Puerto Chiapas	Chiapas	10km costa	No 1m
16	Puerto Vallarta	Jalisco	25km costa	si

5.3 Revisión de los modelos digitales de elevación

Se realizó un análisis del modelo de elevación digital de INEGI debido a la falta de Metadatos de esta información. Para ello se elaboraron contornos (curvas) a partir del modelo de elevación digital a diferentes intervalos de resolución (10, 20, 30 metros). La Figura 1 muestra el modelo de elevación digital y las curvas de nivel cada 20 y 30 metros para una zona de la costa de Acapulco. Las curvas derivadas del modelo definidas a cada 10 y 20 metros presentaron irregularidades geométricas (señaladas dentro del recuadro rojo). Por el contrario, las curvas a cada 30m no presentan este tipo de error, por lo que se concluye que la resolución espacial del modelo es a 30m.



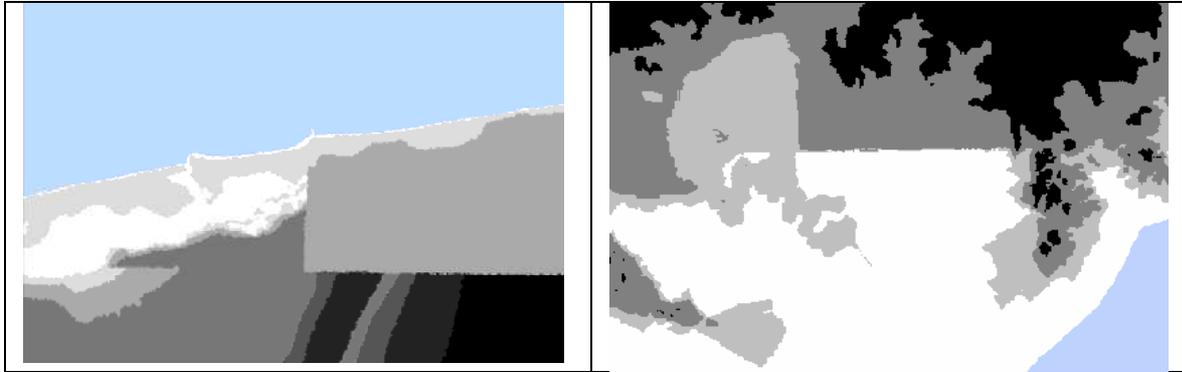
Curvas cada 20 metros

Curvas cada 30 metros

FIGURA 1. Contornos cada 20 y 30 metros derivados del modelo de elevación digital

Por otra parte, se hizo una revisión de las distintas fuentes de información de elevación digital existentes. De esta manera se pudo evaluar si el Modelo de Elevación Digital del INEGI es la fuente de mejor resolución para realizar esta investigación. Las fuentes de información alternas son las cartas topográficas escala 1:50,000 así como las imágenes del Shuttle Radar Mission Topography (SRTM) que tienen una resolución de 90 metros.

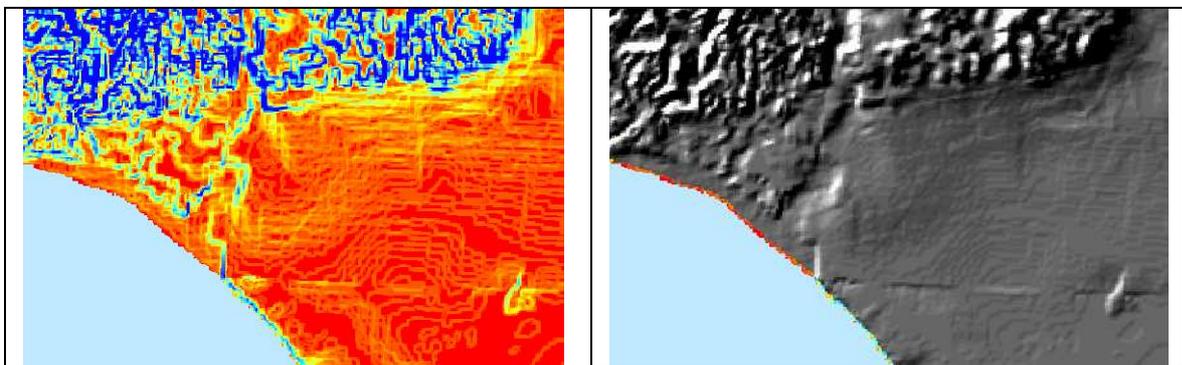
Finalmente se hizo una exploración del modelo de elevación digital en las ciudades de interés, principalmente en las cotas de 1m y 3.5m para verificar la concordancia de las interpolaciones con la realidad del terreno. Las figuras siguientes permiten observar por una parte, el error que presenta el modelo de elevación digital en Progreso, Yucatán en donde la cota de 5m presenta una interpolación irregular. Por otra parte, en Lázaro Cárdenas, Michoacán este error se presenta en la cota de 20m. En el caso de estas dos ciudades, tendremos que recurrir a las fuentes de información mencionadas en el párrafo anterior, para poder hacer los mapas de predisposición dinámica del relieve.



PUERTO PROGRESO, YUCATÁN LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN
FIGURA 2. Irregularidades del modelo de elevación digital identificadas

Elaboración de superficie de inclinación del terreno

Se elaboraron mapas de pendientes del terreno para las ciudades de interés. Estos fueron elaborados a partir del comando "slope" del programa ArcMap 9.0. Con estos mapas se identificarán las zonas de acumulación y dispersión del agua. La Figura 3 presenta la cubierta de pendientes para una sección de la costa de Puerto Vallarta en porcentaje y en un modelo sombreado.



Cobertura de pendientes

Modelo sombreado de pendientes

FIGURA 3. Cobertura de pendientes para una sección de la costa de Puerto Vallarta

5.4 Extracción de la línea de costa

Se trabajó en la definición y estandarización de una metodología para la extracción automatizada de la línea de costa empleando las imágenes QuickBird. Para validar esta metodología. Se comparó el resultado de la metodología automatizada y la digitalización manual de una imagen de Puerto Vallarta

A. Digitalización manual

Se empleó el programa ArcMap 9.0 para la digitalización en pantalla de la imagen QuickBird. La línea de costa se digitalizó a una escala de 1:2,250 que corresponde a la escala de la resolución de la imagen. El criterio considerado para definir el trazo de la línea de costa fue la zona de rompiente de la ola y la zona intermareal.

B. Proceso automatizado

Para el proceso automatizado se utilizó una clasificación no supervisada (Isodata) de la imagen QuickBird empleando un compuesto de falso color con las bandas visibles roja y verde (bandas 3 y 2) así como la banda de infrarrojo cercano (banda 4). Para ello se empleó el programa ENVI 4.2. La línea de costa resultado del isodata corresponde al límite intermareal entre la interfase (arena) seca e interfase (arena) húmeda.

Los resultados se presentan en la Figura 4 donde se observa por una parte la línea de costa digitalizada manualmente (línea roja). Además se comparan los resultados de la extracción automatizada de la línea de costa (en amarillo) con el método de digitalización manual.



Digitalización manual

Extracción automatizada

FIGURA 4. Resultados de la digitalización manual y extracción automatizada de la línea de costa de Puerto Vallarta

5.5 Identificación de la cubierta vegetal

Para poder realizar una clasificación automatizada de la cubierta vegetal es necesario comprender el comportamiento espectral de las imágenes empleadas. De acuerdo a una revisión de las imágenes QuickBird observamos que los valores de reflectancia de las bandas no coinciden con los comportamientos teóricos. En teoría, los valores del agua son muy bajos en la banda 3, sin embargo en la imagen analizada de Puerto Vallarta el comportamiento de los valores es el contrario. Debido a esto se dificulta la correcta clasificación de la vegetación de manera automatizada, por lo que es probable que se hagan modificaciones y adecuaciones en la metodología para cada ciudad.

Se hicieron las primeras pruebas para hacer la identificación automatizada de la vegetación para Puerto Vallarta. Se realizó una clasificación no supervisada (Isodata) de una sección de la imagen usando el mismo compuesto de bandas que en la sección 3 y el programa ENVI 4.2. Se realizaron varias corridas modificando parámetros de número máximo y mínimo de clases, el número de iteraciones y el número de píxeles por clases. Los parámetros identificados que al momento separan de una mejor manera las clases de interés se presentan en la Figura 5.

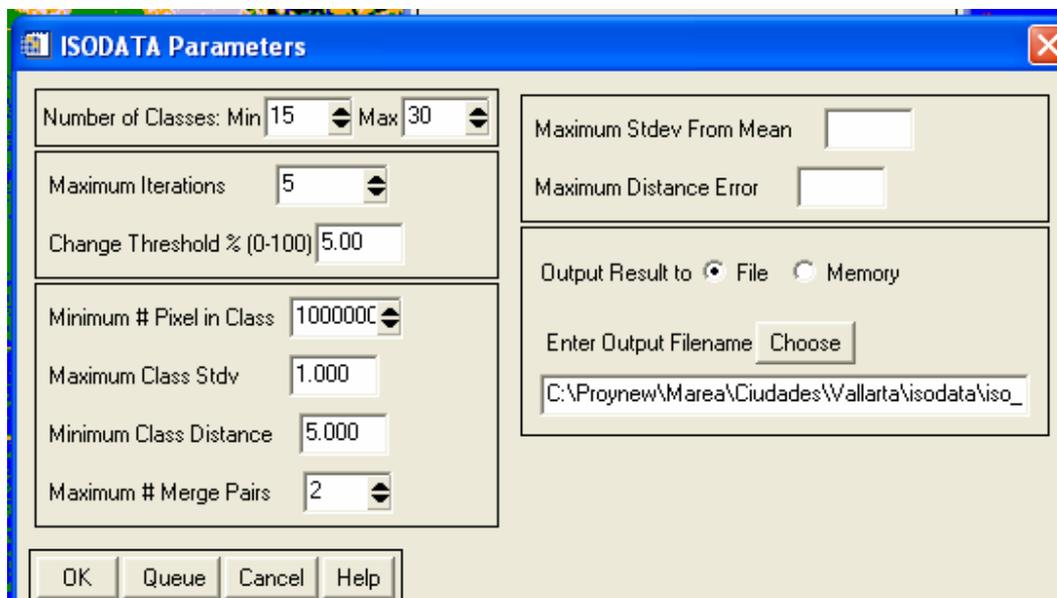


FIGURA 5. Parámetros empleados en el proceso automatizado de clasificación de la cubierta vegetal para una sección de la imagen de Puerto Vallarta.

Los resultados de este procedimiento permitieron clasificar (separar) las áreas cubiertas de agua. No obstante existen dificultades para distinguir las áreas cubiertas por concreto, zonas de suelo expuesto y la arena seca a lo largo de la costa, debido al comportamiento de las firmas espectrales de estas coberturas en las imágenes. Esto se debe a la similitud espectral que presentan estas clases. Seguimos explorando qué procedimientos podrían permitir distinguir estas clases confusas.

Como parte de la clasificación automatizada de la vegetación se realizan procedimientos posteriores a la clasificación que permiten mejorar los resultados. Una vez finalizada la clasificación de la cubierta vegetal (Fase 1) se aplicó un filtrado de la clasificación resultante Majority filter (Fase 2). Este comando permite agrupar y simplificar la información. Finalmente se aplicó a la imagen resultante el proceso Clump (Fase 3) el cual produce una imagen sin efectos de dispersión de los píxeles.

Fase 1

Fase 2

Fase 3

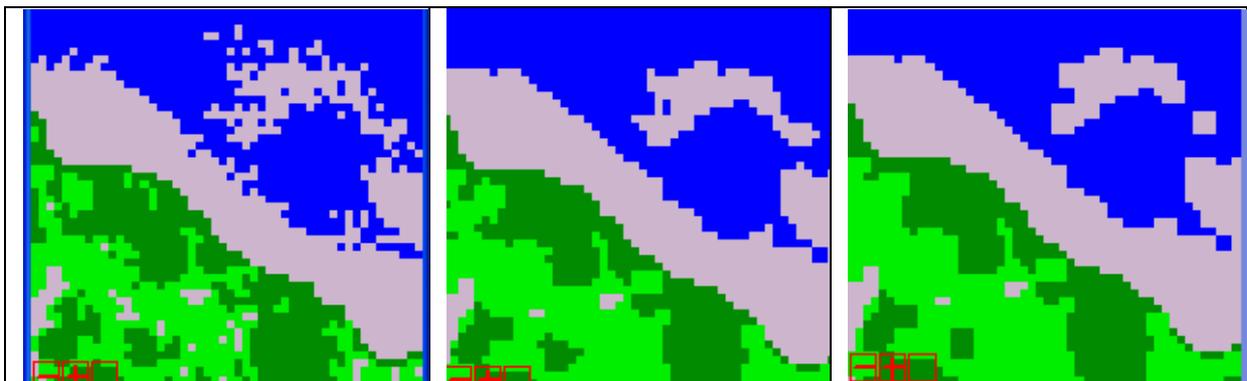


FIGURA 6. Resultados preliminares del procesamiento automatizado de clasificación de la cubierta vegetal

Incorporación de la cartografía de análisis parciales y síntesis, en formato html, para acceder en cualquier computadora sin necesidad de conectarse a un servidor.

5.6 Datos de topografía

Se combinaron las diversas fuentes de información. Uno de los mayores retos es la escases de datos disponibles de la zona costera mexicana. En forma genérica se puede decir que las zonas de mayor interés económico (puertos y zonas turísticas) cuentan con información suficiente y de calidad para utilizarla como datos de entrada para los modelos de predicción de escenarios hidrodinámicos. Por el contrario, las zonas que no forman parte de la red de sitios que generan derrama económica, no cuentan con un monitoreo ni siquiera ocasional de sus condiciones morfológicas.

Se analizó la información por regiones de detalle, cuadradas y de 1° por lado a fin de generar los mapas de inundación con la información disponible. De este modo, se presentan, en la Figura 5 y en la Figura 6 las batimetrías correspondientes a las regiones de detalle que incluyen a la isla de Cozumel, Quintana Roo y al puerto de Progreso, Yucatán, respectivamente.

Tanto la vertiente pacífica como la atlántica del litoral mexicano se han dividido en regiones de detalle como las mostradas en las figuras anteriores y están actualmente siendo empleadas en las ejecuciones del modelo de marea de tormenta.

Como se informó en la etapa anterior, el modelo de marea de tormenta tiene la particularidad de que discretiza el dominio espacialmente con una técnica llamada "quad-tree" en la que el tamaño de las celdas es variable en función del interés que se tenga en determinadas características de la morfología (e.g. línea de costa). La Figura 7 muestra un ejemplo de la malla de cálculo generada para la región de detalle que incluye a la isla de Cozumel, Quintana Roo.

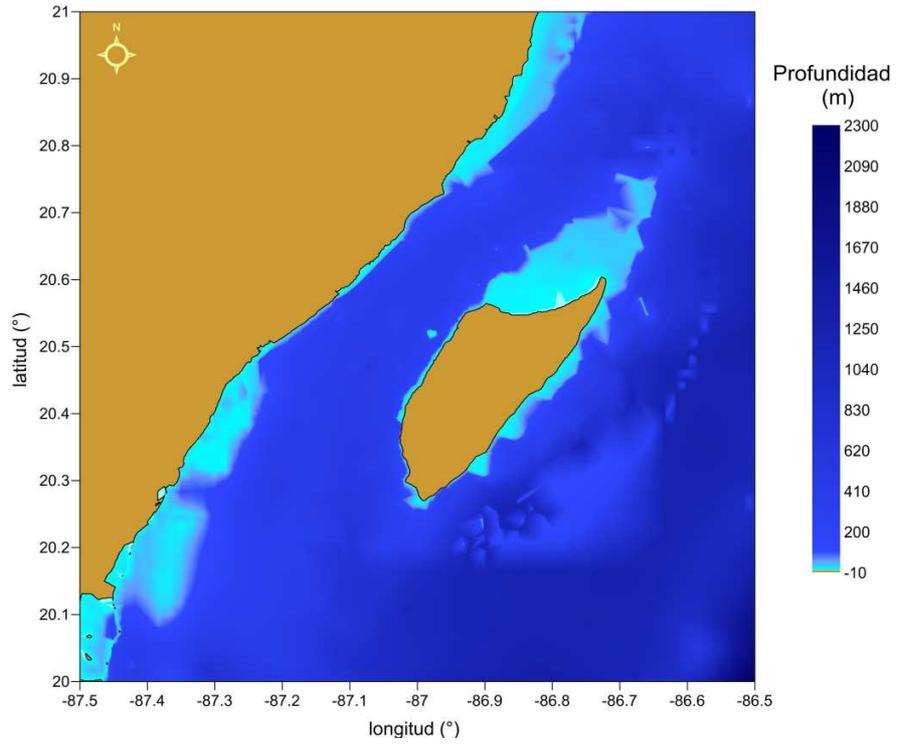


Figura 5 Batimetría de la región de detalle Cozumel, Q. Roo

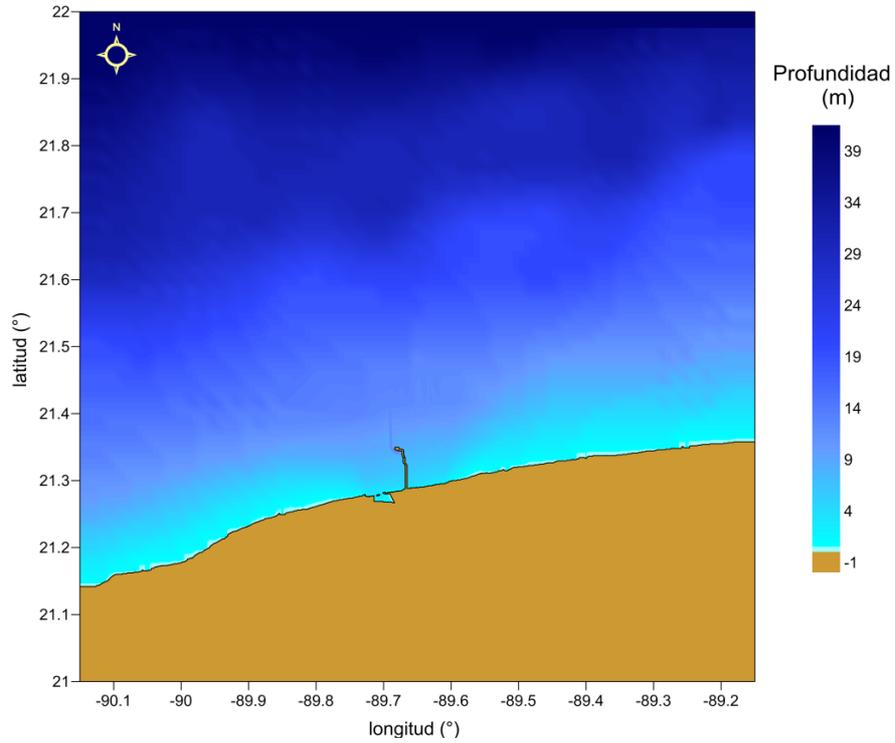


Figura 6 Batimetría de la región de detalle Progreso, Yucatán

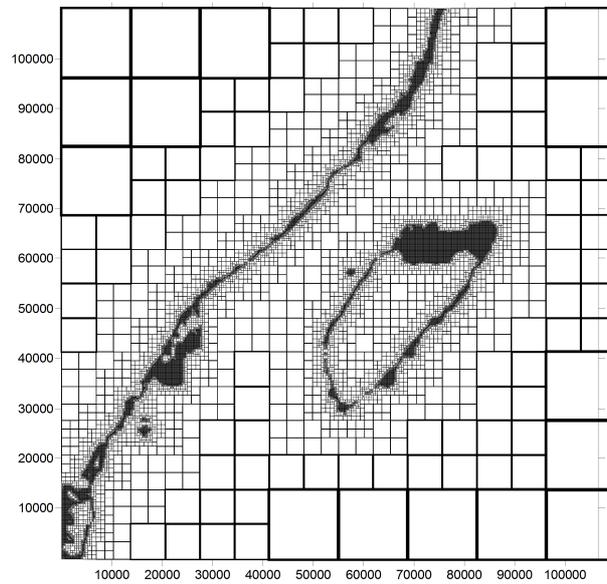


Figura 7 Malla de cálculo de la región de detalle Cozumel

5.7 Descripción del modelo numérico de marea de tormenta.

Se presentan a continuación tanto las ecuaciones que describen la dinámica de la marea de tormenta que resuelve el modelo numérico implementado, como el método de resolución y las condiciones de frontera utilizadas. El modelo numérico puede calcular la circulación inducida por marea astronómica, viento y variación en la presión atmosférica, además permite considerar la influencia de la curvatura de la tierra incluyendo la aceleración de Coriolis.

Para obtener el comportamiento hidrodinámico de un cuerpo de agua se resuelven las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical, obteniéndose las velocidades medias en las direcciones X y Y para cada celda. La velocidad en la dirección X se denomina U, en la dirección Y, V, también se obtiene la sobreelevación de la superficie libre con respecto al nivel medio del mar, la cual se denomina η .

Las ecuaciones de gobierno se discretizan con un esquema de volumen finito, para el cálculo se utiliza una malla jerárquica en coordenadas cartesianas para la parte horizontal y una transformación sigma para la coordenada vertical.

5.8 Modelo numérico Bidimensional

El modelo desarrollado resuelve las ecuaciones de aguas someras discretizándolas bajo un esquema de volumen finito tipo Godunov sobre una malla jerárquica, se utiliza el solucionador de Riemman para resolver la aproximación de Roe con la cual se determinan los flujos no viscosos. (Bautista, 2005), la integración en el tiempo se realiza con el método de primer orden de Adams-Bashforth.

Las ecuaciones promediadas en la vertical, resueltas por el modelo bidimensional son:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (0.1)$$

Donde $H = h + \eta$

η , sobre elevación en la columna de agua con respecto al nivel medio del mar

h , profundidad del fondo con respecto al nivel medio del mar.

Ecuación de cantidad de movimiento zonal

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz + \frac{\partial UVH}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} u'v' dz = \\ fVH - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) + H \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \\ 2H \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (0.2)$$

Donde:

- $u'_{i,k}$, variación vertical de la velocidad respecto al valor promediado
- f , factor de Coriolis
- C_d , coeficiente de arrastre de viento
- C_D , coeficiente de fricción por fondo
- ε_h , coeficiente de viscosidad de remolino
- P_a Presión atmosférica

Ecuación de cantidad de movimiento meridional

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u'v' dz + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz = \\ -fUH - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) + H \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \\ 2H \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (0.3)$$

El factor de Coriolis, f , se calcula con la expresión $f = 2\omega \sin \Phi$, donde $\omega = 7.3 \times 10^{-5}$ rad/s es la velocidad de rotación de la tierra, y Φ es la latitud media del área estudiada.

Para expresar las tensiones de Reynolds en las ecuaciones (0.2) y (0.3), se utiliza el concepto de viscosidad de remolino propuesto por Boussinesq (1877), con hipótesis de presión hidrostática. Básicamente, haciendo la analogía con las tensiones viscosas

en un flujo laminar, este concepto asume que las tensiones de Reynolds son proporcionales a los gradientes de las velocidades promediadas en la vertical.

Condiciones de frontera del modelo bidimensional

Fronteras cerradas

Se considera que la velocidad normal a la frontera es cero, por lo tanto los flujos perpendiculares no cruzan la línea de costa. Para el flujo paralelo se implementa una condición deslizante, la velocidad en dicha frontera es igual en magnitud y sentido a la velocidad en el centro de la celda. Con este tipo de condición el flujo en la dirección perpendicular a la frontera es reflejado y el flujo paralelo no sufre alteración.

Para la superficie libre se considera que es absorbida por la frontera, por lo tanto se conserva.

Fronteras laterales abiertas

Para las fronteras abiertas en los límites de la malla, el modelo utiliza una condición de frontera abierta para todas las variables, por lo tanto existe una total transmisión de información. La sobrelevación de la superficie libre, la velocidades paralela y perpendicular a dicha frontera se conservan y no son afectadas por ésta.

Frontera superior abierta

Los esfuerzos cortantes debidos al viento son de la forma

$$\tau_{xz(\eta)} = C_a \rho_a W_x W \quad (0.4)$$

Donde C_a es el coeficiente de arrastre del viento, el cuál tiene un valor de 0.0026, Falconer (1994). ρ_a es la densidad del aire, W es la velocidad del viento medida a 10 m sobre el nivel del mar. W_x es la componente en X del viento, $W_x = W \cos \theta$, y θ es el ángulo de incidencia del viento con respecto al eje X .

Frontera inferior cerrada (Fondo)

Los esfuerzos cortantes debidos a la fricción en el fondo del mar se evalúan con la expresión

$$\tau_{xz(-h)} = \rho_o C_D \left| \bar{v} \right| u_{-h} \quad (0.5)$$

Dónde: ρ_o es la densidad del agua de mar, C_D es el coeficiente de arrastre, el cuál es función del coeficiente de Chezy, $\left| \bar{v} \right| = \sqrt{(u_{-h})^2 + (v_{-h})^2}$ es el módulo de la velocidad en la última capa, u_{-h} es la velocidad en la dirección X en el fondo del mar.

El coeficiente de arrastre puede calcularse con (1.6)

$$C_D = \frac{g}{C^2} \quad (0.6)$$

Dónde C se calcula de acuerdo a la fórmula de Colebrook-White, $C = 18 \log \left(\frac{12H}{k_s} \right)$ y k_s es un parámetro que depende de la rugosidad del fondo marino, el modelo propuesto utiliza $k_s = 0.2$, como lo propone Castanedo (2000).

Cuando el modelo se ejecuta solamente en el modo bidimensional, la condición de frontera en el fondo se calcula con las velocidades promediadas en la vertical U y V en vez de u_{-h} y v_{-h} . Cuando el modelo tridimensional comienza a ejecutarse, se utilizan las velocidades u_{-h} y v_{-h} obtenidas en el último paso de tiempo de la ejecución anterior tridimensional.

Coeficiente de viscosidad de remolino en dos dimensiones

El modelo numérico presentado tiene dos opciones, considerar un coeficiente de viscosidad constante o un variable calculado con la siguiente expresión.

$$\epsilon_h = l^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (0.7)$$

Donde: $l^2 = C_s \Delta x \Delta y$, según Blumberg (1987) el valor de C_s es 0.1, para Castanedo (2000) es 0.05

Ecuaciones del modelo bidimensional discretizadas en volumen finito

Le ecuaciones promediadas en la vertical se discretizan bajo un esquema de volumen finito utilizando la aproximación de Roe para los términos convectivos no lineales. La integración en el tiempo se realiza con la técnica de primer orden de Adams Bashforth.

Es importante realizar acotar que el término $gH \partial \eta / \partial x$, en la ecuación (0.2), es usualmente dividido de la siguiente manera para permitir la formulación hiperbólica utilizada por diversos investigadores (Alcrudo y García-Navarro, 1993)

$$gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = gHS_{ox} + \frac{1}{2} g \frac{\partial (H^2)}{\partial x} \quad (0.8)$$

Donde S_{ox} es la pendiente del fondo en la dirección X.

Una consecuencia de utilizar esta formulación convencional es que el esquema produce resultados inadecuados cuando se aplica a fondos no uniformes Esta dificultad es superada dividiendo y redistribuyendo el término $gH \partial \eta / \partial x$ de la siguiente manera (Rogers, 2001)

$$gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = g\eta S_{ox} + \frac{1}{2} g \frac{\partial (\eta^2 + 2\eta h)}{\partial x} \quad (0.9)$$

La formulación (0.9) mantiene la naturaleza hiperbólica de las ecuaciones de aguas someras y permite que la exactitud de este esquema se preserve.

Al aplicar una operación similar al término $gH \partial \eta / \partial y$ de la ecuación (0.3), las ecuaciones de ondas largas quedan de la siguiente manera

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (UH)}{\partial x} + \frac{\partial (VH)}{\partial y} = 0 \quad (0.10)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial \left[U^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left(UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz \right)}{\partial y} \\
 & - \left(\frac{\partial^2 H \varepsilon_h U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H \varepsilon_h U}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2 2HU \varepsilon_h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 H \varepsilon_h U}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial y \partial x} = \quad (0.11) \\
 & fVH - gHS_{ox} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial \left[U^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left(UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz \right)}{\partial y} \\
 & - H \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - 2H \frac{\partial U}{\partial x} \left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \right) - H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \\
 & fVH - gHS_{ox} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial \left(UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left[V^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz \right]}{\partial y} \\
 & - \left(\frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 H \varepsilon_h U}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial 2HV \varepsilon_h}{\partial y \partial x} = \quad (0.12) \\
 & -fUH - gHS_{oy} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial y}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial \left(UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left[V^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz \right]}{\partial y} \\
 & - H \varepsilon_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - 2H \frac{\partial V}{\partial y} \left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \right) = \\
 & -fUH - gHS_{oy} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial y}
 \end{aligned}$$

Es posible obtener otras formulaciones matemáticas, pero cuando se construye el sistema de flujo Jacobiano y se discretizan las ecuaciones utilizando volumen finito, estas ecuaciones pueden producir resultados no hiperbólicos e incondicionalmente inestables. La formulación adoptada permite utilizar la aproximación de Roe en el solucionador de Riemman para evaluar el flujo no viscoso entre dos celdas adyacentes para toda la batimetría.

Integración numérica

Las ecuaciones (0.10), (0.11) y (0.12) pueden escribirse en forma integral como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} q d\Omega + \int_{\Omega} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \right) d\Omega = \int_{\Omega} h d\Omega \quad (0.13)$$

Donde Ω es el dominio del problema, q es el vector con las variables conservativas, f y g son los vectores de flujo y h es el vector con los términos fuente. Los vectores q , f , g y h están dados por:

$$\begin{aligned}
 q &= \begin{bmatrix} H \\ UH \\ VH \end{bmatrix} \\
 f &= \begin{bmatrix} UH \\ U^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial x} - \frac{\partial 2HU \varepsilon_h}{\partial x} \\ UVH + \int_{-h}^{\eta} u'v' dz - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial x} - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial y} - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial x} \end{bmatrix} \\
 g &= \begin{bmatrix} VH \\ UVH + \int_{-h}^{\eta} u'v' dz - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial y} - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial y} - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial x} \\ V^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial y} - \frac{\partial 2HV \varepsilon_h}{\partial x} \end{bmatrix} \\
 h &= \begin{bmatrix} 0 \\ fVH - g\eta S_{ox} + \frac{1}{\rho_o}(\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o}H \frac{\partial P_a}{\partial x} \\ -fUH - g\eta S_{oy} + \frac{1}{\rho_o}(\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o}H \frac{\partial P_a}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{0.14}
 \end{aligned}$$

Aplicando el teorema de Green (o de Gauss) al segundo término de la ecuación (0.13) se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} q d\Omega + \int_{\hat{S}} \hat{f} dS = \int_{\Omega} h d\Omega \tag{0.15}$$

Donde S es la frontera de Ω y \hat{f} es el vector de flujo de las funciones a través de S, dado por:

$$\hat{f} = fn_x + gn_y \tag{0.16}$$

En la ecuación anterior n_x y n_y son las componentes cartesianas de n , el vector unitario normal a S. Esta ecuación puede escribirse en términos de los flujos viscosos y no viscosos, de la siguiente manera.

$$\hat{f} = f^I - \varepsilon_h f^V \quad (0.17)$$

Donde:

$$f^I = \begin{bmatrix} UHn_x + VHn_y \\ \left(U^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz \right) n_x + \left(UVH + \int_{-h}^{\eta} u'v' dz \right) n_y \\ \left(UVH + \int_{-h}^{\eta} u'v' dz \right) n_x + \left(V^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz \right) n_y \end{bmatrix} \quad (0.18)$$

$$f^V = \begin{bmatrix} 0 \\ \left(-\frac{\partial HU}{\partial x} - \frac{\partial 2HU}{\partial x} \right) n_x + \left(-\frac{\partial HU}{\partial y} - \frac{\partial HU}{\partial y} - \frac{\partial HV}{\partial x} \right) n_y \\ \left(-\frac{\partial HV}{\partial x} - \frac{\partial HU}{\partial y} - \frac{\partial HV}{\partial x} \right) n_x + \left(-\frac{\partial HV}{\partial y} - \frac{\partial 2HV}{\partial y} \right) n_y \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones anteriores son discretizadas en una malla con UH, VH y H localizados en el centro de cada celda. Como se muestra en la Figura 8.

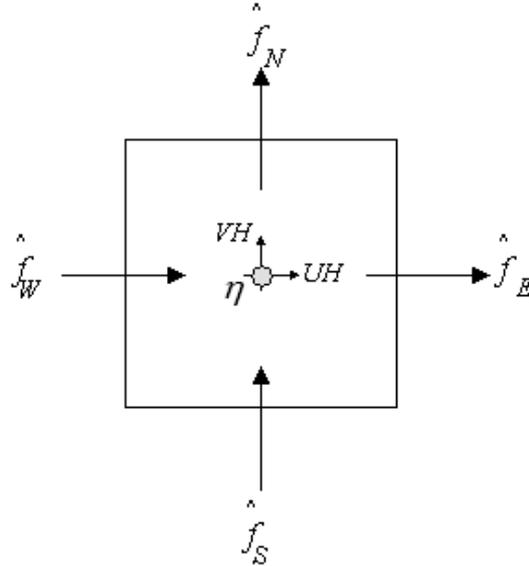


Figura 8. Volumen de control en el que se indican las variables

Para cada celda del dominio de cálculo, la ecuación (0.15) puede describirse de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial Vq}{\partial t} \right|_i = - \int_{\partial C_i} \hat{f} dS + AH \Big|_i \quad (0.19)$$

Donde q_i y h_i son los valores centrales de la celda, A_i denota el área de la celda i . El término Vq dentro del diferencial con el subíndice i se refiere a la derivada temporal de la celda de área V_i y el vector q_i .

Para las celdas del Quadtree ∂C_i representa la integral a lo largo de las cuatro caras de este y el flujo se considera uniforme a través de las caras. La integral de superficie de la ecuación (0.19) puede evaluarse en forma discreta con:

$$\int_{\partial C_i} \hat{f} dS = - \left(\hat{f}_E - \hat{f}_W + \hat{f}_N - \hat{f}_S \right) \Delta S \quad (0.20)$$

Donde \hat{f}_E , \hat{f}_W , \hat{f}_N y \hat{f}_S son los vectores de flujo a través de las caras este, oeste, norte y sur de la celda como se muestra en la Figura 8, y ΔS es la longitud de cada lado de la celda

5.9 Modelo de generación de malla

El objetivo del modelo implementado en este trabajo es crear una malla jerárquica múltiple en dos dimensiones alrededor de un conjunto de puntos semillas que pueda ser utilizada por el modelo hidrodinámico. Entre las ventajas que se tienen al utilizar esta técnica de mallado jerárquico se encuentran: la generación de la malla es automática, sin importar la aparente complejidad del dominio. Las variables estudiadas son almacenadas de una forma semejante a un árbol genealógico, lo cual permite su fácil ubicación. El mallado jerárquico permite un gran refinamiento en aquellas zonas con grandes gradientes de flujo. No es necesaria una transformación del sistema de coordenadas.

Para realizar este tipo de mallado jerárquico (del tipo Quadtree ya que cada celda es siempre dividida en 4 cuadrantes) son necesarios cuatro pasos: división en submallas, generación inicial, regularización y verificación, a continuación se describen cada uno de estos pasos.

Generación inicial

Se denomina generación inicial al proceso de creación de la malla alrededor de los puntos semillas que se encuentran comprendidos dentro de cada submalla, este proceso finaliza cuando se alcanzan alguno de los dos siguientes criterios: a) el máximo nivel de refinamiento es alcanzado (este es un dato inicial) y b) un punto semilla queda sólo en una celda.

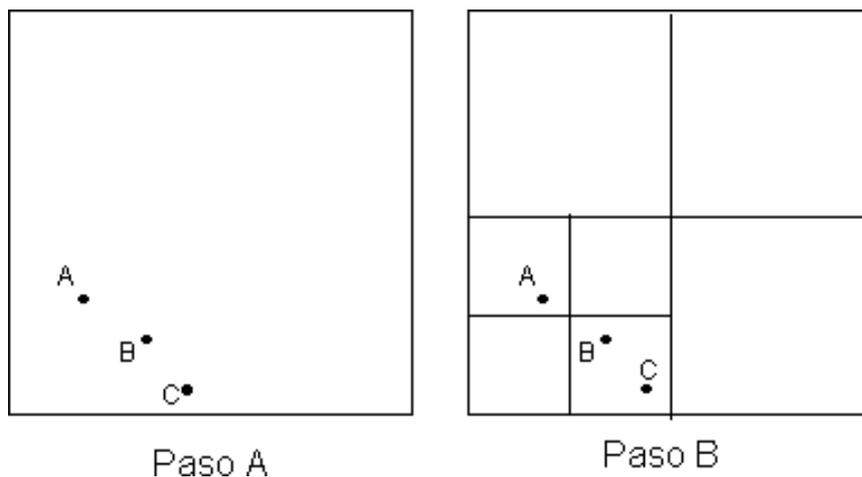
Es normal esperar que la malla obtenida después de esta primera generación tenga zonas con problemas, ya que la relación de tamaño entre una celda y sus vecinas puede ser mayor al doble o menor a la mitad (2 a 1 ó 1 a 2), debido a que esta es la máxima relación que es posible aceptar es necesario un segundo paso donde se revisen las celdas para garantizar que no existan relaciones 1 a 4 ó 1 a 8.

Los datos iniciales necesarios para la realización del segundo paso son los siguientes: una malla base y regular de puntos semillas que representan la batimetría, topografía y el trazado del emisor submarino, en la cuál la cantidad de puntos por cada lado de la malla es potencia de 2, dicha condición es necesaria para que al realizar la malla Quadtree, en cada una de sus cuadros quede como mínimo un punto semilla que permita conocer la profundidad de esta celda. Estos puntos semillas deben tener coordenadas en X, Y y Z (una coordenada en z positiva indica que el punto está en el mar y una negativa que se encuentra sobre la tierra), los límites máximos y mínimos de las elevaciones entre los cuales se quiere desarrollar la malla jerárquica, los anchos de las celdas en las direcciones X y Y de la malla base.

Con los datos anteriores se realiza una selección de aquellos puntos que están entre las elevaciones antes mencionadas, por ejemplo, aunque el área de estudio se encuentre comprendida entre las elevaciones 50 y -15 m, la malla jerárquica puede desarrollarse entre las elevaciones 25 y -5m. Es importante mencionar que aunque el cálculo de las velocidades y sobreelevaciones no se realiza en celdas con profundidades negativas, es necesario que en la línea de costa se tenga la misma resolución de la malla en la parte positiva y negativa.

El proceso de creación de la malla quadtree es el siguiente: todas las coordenadas X y Y de los puntos seleccionados son escaladas a un cuadrado unitario, se seleccionan los dos primeros puntos y se comienza la subdivisión en cuadrantes hasta que se satisfacen uno de los dos criterios mencionados anteriormente, luego se seleccionan los puntos dos y tres y se realiza nuevamente el paso anterior, Finalmente se revisa que el último punto y el primero se encuentren en celdas separadas.

En la Figura 9 se presenta el esquema de creación de una malla quadtree para 3 puntos, en el primer paso se encuentran los puntos A, B y C dentro de un cuadrado que ya ha sido escalado unitariamente, en el paso B se han tomado los puntos A y B y se ha dividido el cuadrado en cuadrantes hasta que los puntos queden en celdas diferentes, en el tercer paso se toman los puntos B y C y subdivide el subcuadrado donde se encuentran hasta que quedan en celdas diferentes, finalmente se revisa que los puntos C y A estén en celdas distintas.



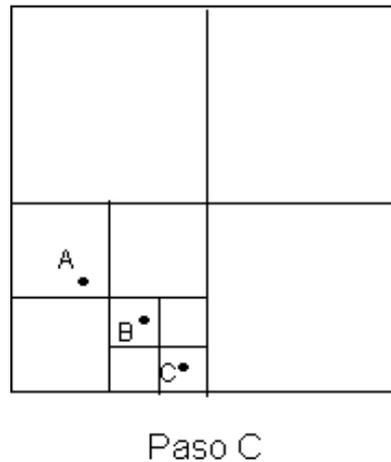


Figura 9. Esquema de creación de malla jerárquica para tres puntos.

Para cada celda de la malla se obtienen los siguientes resultados: tipo de celda, coordenadas del centro de la celda, ancho, nivel de subdivisión y número de identificación así como el nivel de subdivisión de sus vecinos. A continuación, se describen el sistema de numeración y la manera de obtener las coordenadas del centro de la celda.

Sistema de numeración

La subdivisión de una celda consiste en la creación de cuatro nuevas celdas que representan los cuatro cuadrantes ortogonales de la celda inicial, estas nuevas celdas son conocidas como celdas hijas y la celda inicial se denomina celda madre.

Para cada celda hija, un número de identificación (N) es asignado, de la siguiente manera, a la celda inferior izquierda se le asigna el número 1, superior izquierda, el 2, inferior derecha el 3 y a la celda superior derecha el 4. Considerando el tercer paso de la Figura 9 la celda que tiene el punto A tiene como número de identificación 12, la celda con el punto C tiene 133. La ventaja de este sistema de numeración sobre los anteriores trabajos con mallas Quadtree es que el sistema empleado identifica cada celda con un solo dígito, los sistemas anteriores necesitan 2, con este sistema se logran ahorros importantes de recursos de cómputo.

Geometría

Las coordenadas X y Y del centro de cada celda se obtienen a partir del número de identificación de la celda (N), (Posada, 2004), con las siguientes fórmulas:

$$x_{mid}^M = 0.5 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{2^{m+1}} \left(2INT\left(\frac{N_m - 1}{2}\right) - 1 \right) \quad (0.21)$$

$$y_{mid}^M = 0.5 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{2^{m+1}} \left(2N_m - 4INT\left(\frac{N_m - 1}{2}\right) - 3 \right) \quad (0.22)$$

Donde M es el nivel de subdivisión, e INT se refiere a la parte entera del número entre paréntesis. Nm es el dígito m del número N. Para la celda que contiene al punto C de la Figura 1.3 las coordenadas en X y Y son 0.4375 y 0.0625 respectivamente.

Ancho

El ancho de una celda se obtiene con la fórmula (1.3), donde M se definió anteriormente:

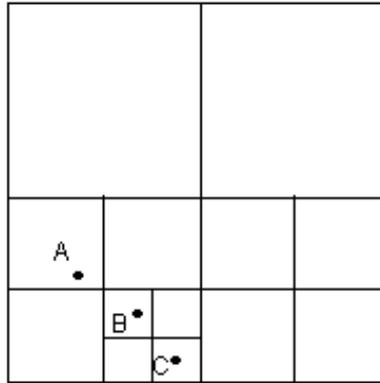
$$\Delta l = \frac{1}{2^M} \quad (0.23)$$

Para la celda que contiene el punto C de la figura 1 el ancho es 0.125

Regularización

El objetivo del tercer paso es garantizar que entre celdas vecinas la relación máxima es 1:2, esto es necesario para evitar interpolaciones excesivamente complicadas entre celdas adjuntas. Dicha relación provee además un balance adecuado entre la eficiencia numérica y la uniformidad de la malla.

La regularización comienza con las celdas de menor tamaño, si sus vecinos tienen una relación mayor a 1:2, estos se subdividen hasta que la relación sea alcanzada, a continuación se repite este proceso con los vecinos de los vecinos hasta que todas las celdas son revisadas. En el paso D de la Figura 10 presenta la malla Quadtree ya regularizada para los 3 puntos semillas.



Paso D

Figura 10. Malla regularizada para el ejemplo 1

Después de que se realiza la regularización cada una de las celdas es clasificada con respecto a su ubicación (en el mar o en la tierra), si es frontera o se encuentra en el interior de la malla y relativa al tamaño que ésta tiene con sus vecinos, esto es necesario para conocer que interpolación deben realizar los modelos hidrodinámicos. En la Figura 11 se presenta la clasificación correspondiente a las celdas con profundidad positiva que se encuentran dentro del dominio de cálculo y están rodeadas por celdas con agua, en total se identificaron 409 tipos de celdas distintas.

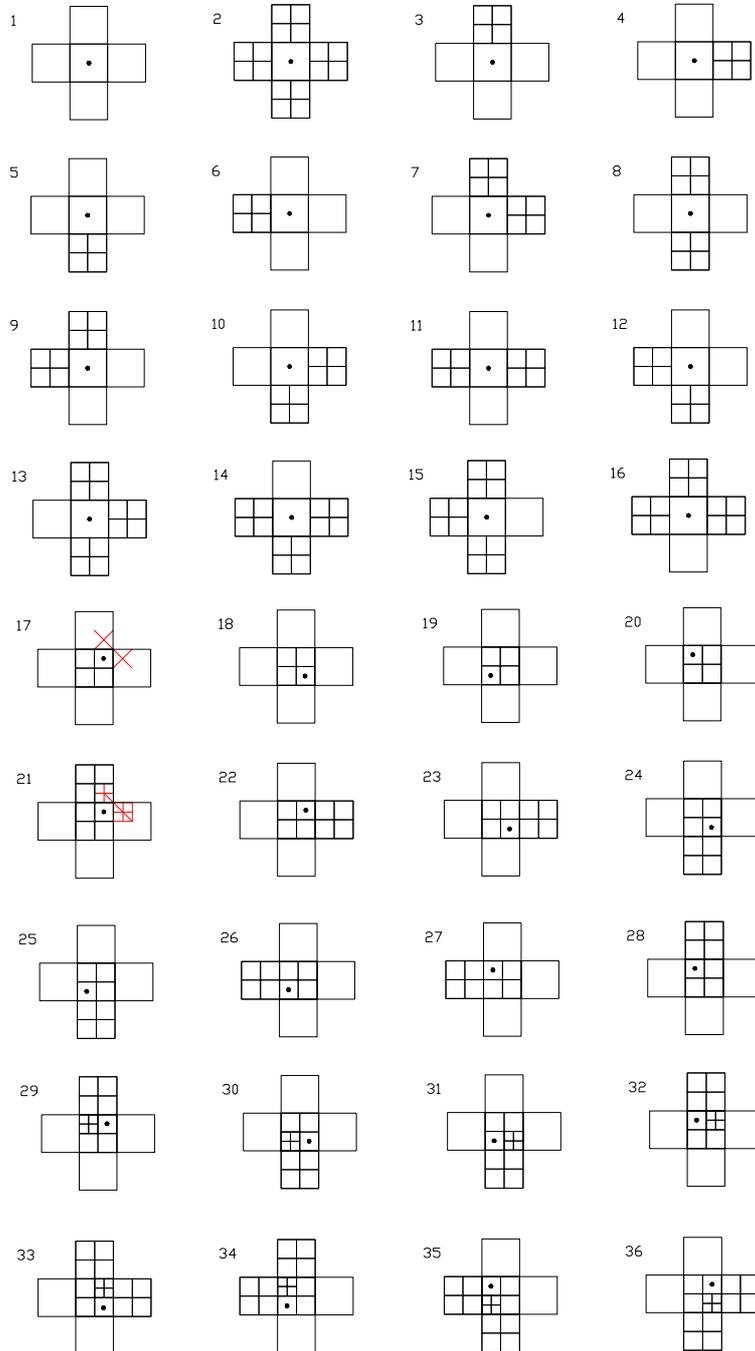


Figura 11. Tipos de celdas interiores con profundidad positiva

5.10 Ejemplo de casos de aplicación

Para ejemplificar los pasos descritos anteriormente se desarrollan dos ejemplos, el primero una malla Quadtree para el sistema lagunar Nichupté, el segundo la malla con la cual se realizará la modelación hidrodinámica del Golfo de México.

Para la construcción de la malla en la laguna de Nichupté se han seleccionado los puntos comprendidos entre 2 m de profundidad y 1.5 m de altitud, la malla regular base que sirve para conocer la profundidad asociada a cada celda es de 512 por 512 celdas con un ancho de celdas de 20 por 39 m. En la Figura 10 se muestra la malla obtenida.

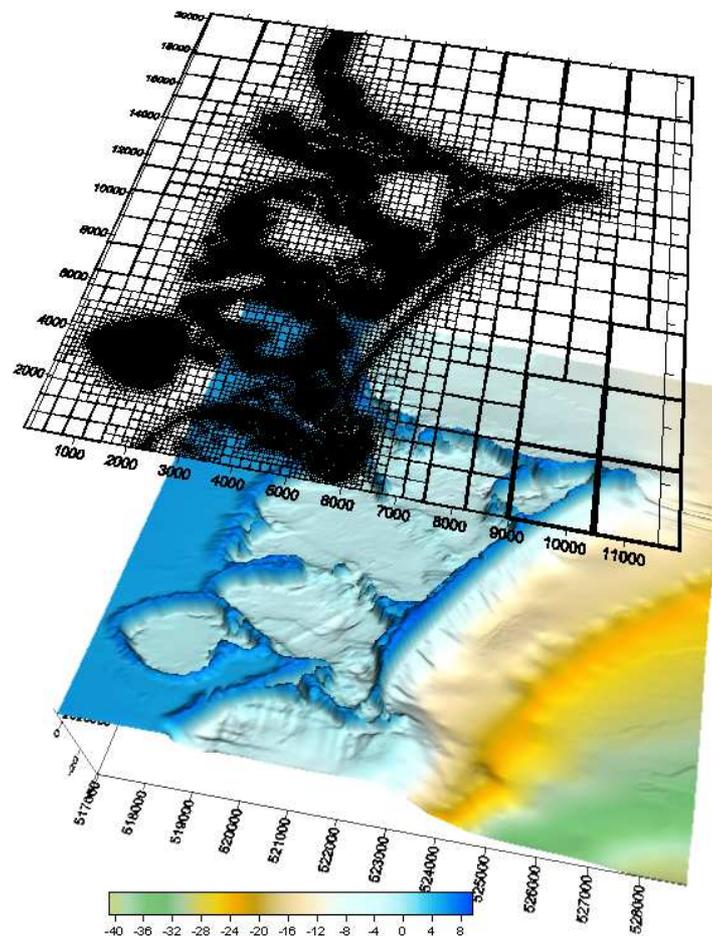


Figura 12. Batimetría de la bahía de Acapulco.

Para construir la malla del Golfo de México se tomaron dos fuentes de información para la batimetría y topografía, las cartas de la Secretaría de Marina digitalizadas, generales y de detalle, y la base de datos del National Geophysical Data Center (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html), en la Figura 14 se observa la región obtenida



Figura 13. Línea de costa obtenida de las cartas de la Secretaría de Marina de México.

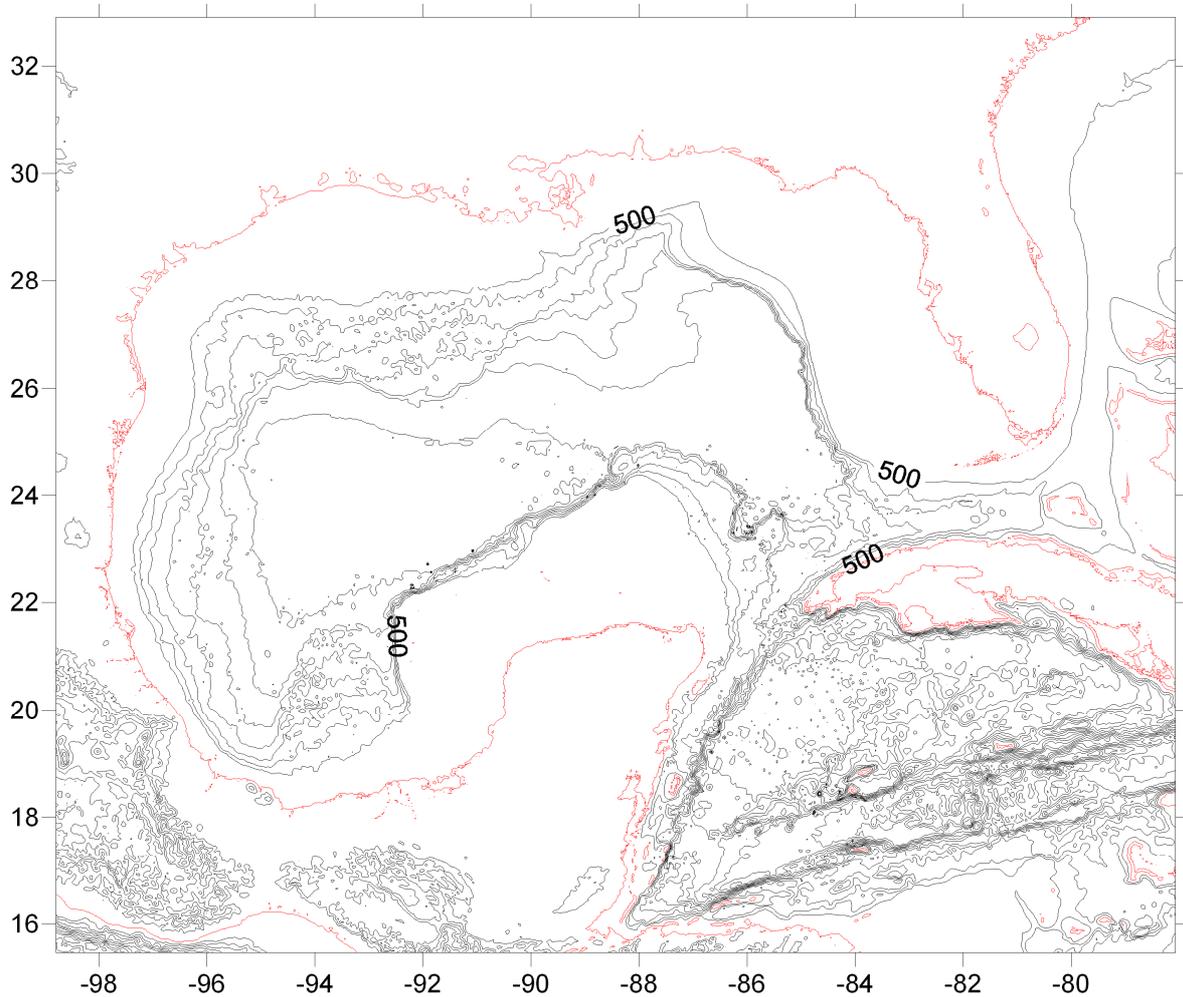


Figura 14. Batimetría del Golfo de México

Se construyó una malla base de 1024 por 1024 celdas, las cuales tienen un ancho de 2253 m y 1896 m en la dirección X y Y, respectivamente. La malla regular tiene 1048576 celdas, la malla quadtree generada tiene 377326 celdas, lo cual representa un ahorro del 64% en la cantidad de celdas modeladas, en la nueva malla la máxima resolución se obtiene entre las cotas 300 m y -30 m. la Figura 15 muestra la malla anteriormente descrita

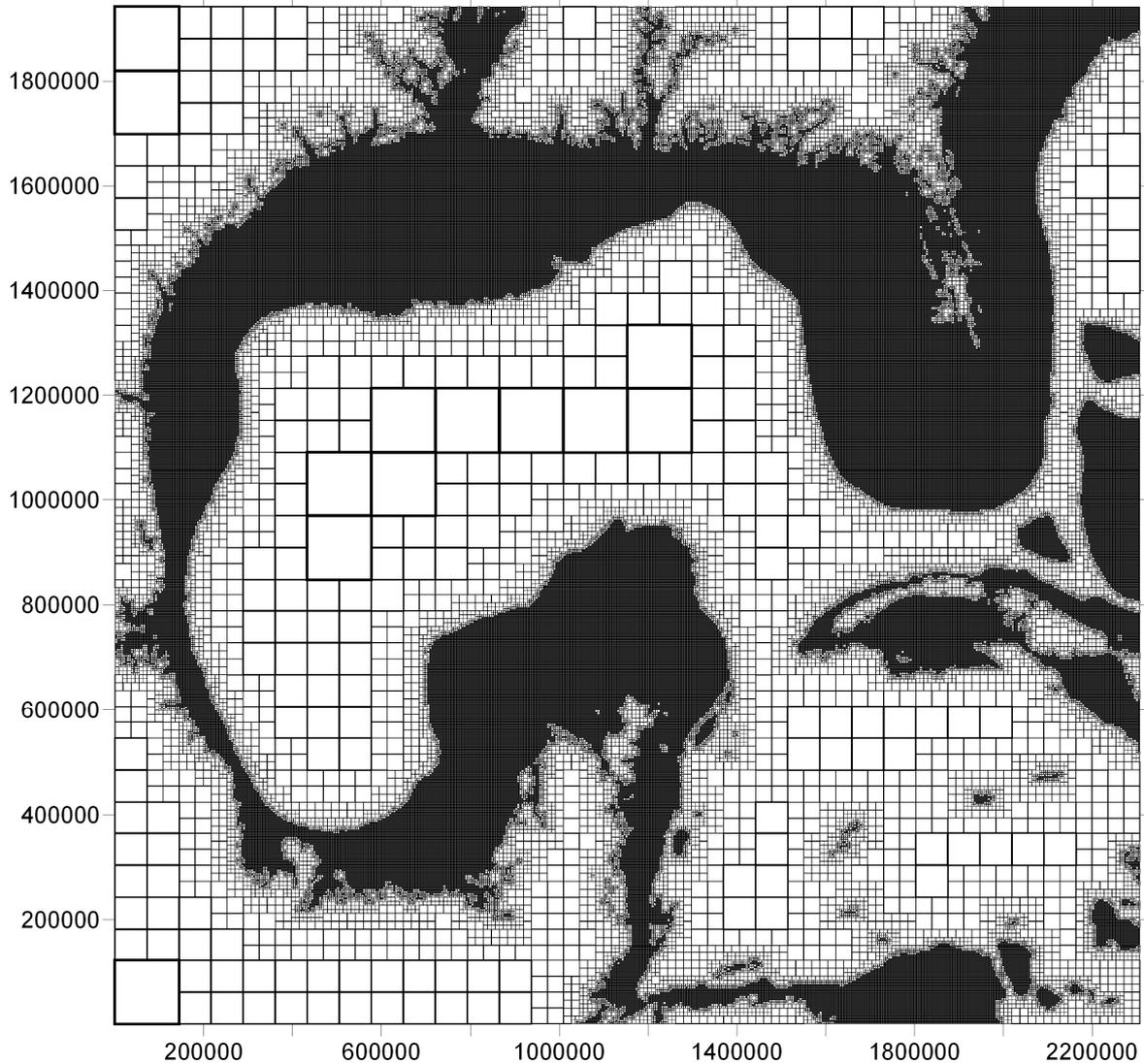


Figura 15. Malla Quadtree para el Golfo de México.

5.11 Validación de resultados para el modelo bidimensional

Se realizan dos validaciones para el modelo bidimensional, en una de las cuales, la acción externa se analiza el comportamiento de una onda larga en un canal de ancho y fondo variables, en la otra validación se comprueba el patrón de velocidades originado en una cuenca cerrada cuando el viento es la fuerza actuante.

Estimación de campos de viento y presión.

Se utilizó el programa HURAC el cual permite calcular los campos de viento y presión para un huracán en específico basándose en los boletines meteorológicos del National Hurricane Center (NHC) de la National Oceanographic and Atmosphere Agency (NOAA). Este modelo consiste en una adecuación de los modelos del Hydromet-Rankin Vortex de Holland (1980) y Bretchsneider (1990), realizada por Silva et al. (2002). El HURAC se encuentra integrado por 3 submodelos, que realizan el cálculo de los campos de presión, viento y oleaje (Silva, 2005)

La presión atmosférica se modela como

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) \exp\left(\frac{R}{r}\right) \quad (24)$$

Donde, P_r representa la presión que se evalúa a una distancia radial r del centro de la tormenta, P_0 es la presión que se registra en el centro del huracán; P_N se identifica como la magnitud de la presión en condiciones no extremas y R es el valor del radio, en el cual se presentan los máximos vientos ciclostróficos. Las unidades de medida de las presiones de la expresión anterior se encuentran en milibares y las distancias en km.

Para la modelación del viento se determinan los valores del gradiente máximo del campo de vientos y la velocidad a diez metros sobre el nivel del mar. El máximo gradiente de viento U_R (en km/h), para un ciclón estacionario se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_0} - 0.5fR \quad (25)$$

En la cual, f es el parámetro de la aceleración de Coriolis, $f = 2\omega \sin \phi$, ω es la velocidad angular de la Tierra, $\omega \approx 0.2618 \text{ rad/h}$, y ϕ es la latitud ($^\circ$). Para conocer, entonces, la velocidad del viento (km/h) en un punto determinado del huracán se utiliza la siguiente formulación:

$$W = 0.886[F_v U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (26)$$

Donde, $(\theta + \beta)$ es el ángulo total que se encuentra entre el vector de la velocidad de traslación; V_F (km/h) y la velocidad del viento U_R (km/h), localizado a una distancia radial, r , que inicia desde del centro del huracán; dicha distancia puede considerarse como positiva si se encuentra en el lado derecho del huracán o negativa si se localiza en el lado izquierdo. F_v es un coeficiente de amortiguamiento que se conoce a partir

de la relación de la velocidad del viento en r , de U_r y UR y se estima a partir de las siguientes relaciones:

$$F_v = 1 - 0.971 \exp \left[-6.826 \left(\frac{r}{R} \right)^{4.798} \right] \quad \frac{r}{R} < 1 \quad (27)$$

$$F_v = \exp \left[A \ln^3 \left(\frac{r}{R} \right) \exp \left[B \ln \left(\frac{r}{R} \right) \right] \right] \quad \frac{r}{R} > 1 \quad (28)$$

Donde:

$$A = -0.99 [1.066 - \exp(-1.936N_c)] \quad (29)$$

$$B = -0.357 [1.4456 - \exp(-5.2388N_c)] \quad (30)$$

En las ecuaciones (29) y (30), N_c determina el número de Coriolis ciclostrófico,

$$N_c = \frac{fR}{U_r} \quad (31)$$

Debido a que no todos los reportes meteorológicos proporcionan el valor de la presión central en un huracán así como el radio ciclostrófico, el modelo paramétrico utiliza los criterios de Silva *et al.* (2002) para estimarlos.

5.12 Base de datos de trayectorias e intensidad de huracanes

Los avances en el acceso a cantidades masivas de datos se han desarrollado en conjunción con avances en el ancho de banda de Internet. Una de las herramientas desarrolladas en este contexto es OPeNDAP, protocolo para solicitar y transferir datos a través de la web, el cual simplifica todos los aspectos de interconexión de datos permitiendo un acceso sencillo a datos remotos independientemente del formato de almacenamiento local.

La combinación de acceso y transferencia de datos mediante OPeNDAP se logra a través del formato binario llamado NetCDF (Network Common Data Format), creado por UNIDATA como formato estándar para aplicaciones a la comunidad científica. La característica de este formato es que contiene suficiente información para identificar el tipo de dato (tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creó, etc.). También se puede contar como otra de sus características la portabilidad de su

formato, es decir, que puede ser manipulado por cualquier computadora que tenga las librerías NetCDF instaladas en un disco duro.

MATLAB es un lenguaje versátil, ágil y de alto desarrollo para el cálculo técnico. Además, posee una caja de herramientas (toolboxes) que puede ser incrementada por el usuario. Para obtener los datos de presiones mínimas de los huracanes que impactaron en México, se realizó la instalación de la caja de herramientas de NetCDF en MATLAB. Estas herramientas, puestas a trabajar de manera conjunta, permite un manejo adecuado de información a distancia sin requerir transferir archivos completos.

Se compiló una base de datos de los huracanes que han afectado a la Republica Mexicana, tanto para las costas en el Océano Pacífico y como en el Océano Atlántico, analizando las trayectorias de los huracanes que han ocurrido desde 1949 para el Pacífico y desde 1852 para el Atlántico hasta la fecha. Estos se encuentran en la base de datos histórica de la página web del Centro Nacional de Huracanes de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, NHC y NOAA por sus siglas en inglés, y en la base de datos de Huracanes del Unisys Weather.

Después de obtener una base de datos completa, se realizó la instalación de las herramientas de NCTOOLS en MATLAB, así como de la herramienta OPeNDAP, utilizando programación en MATLAB, transfiriendo presiones superficiales mínimas, velocidades máximas, fechas y trayectorias de los huracanes de interés.

5.13 Programación en PHP de algoritmos para consulta interactiva en un servidor WEB

Requerimientos del sistema:

Software:

PHP 5.0 o superior

Apache 2.0 o superior

Actividades realizadas

PHP

Programas creados

Programa el cual modifica el formato de los archivos de entrada los cuales contenían los datos obtenidos del modelo hidrodinámico

Programa de generación de graficas procesadas del modelo hidrodinámico que representan las nueve direcciones y seis velocidades las cuales se muestran dentro de

la pagina en la sección Graficas, donde el usuario selecciona el estado, y la celda que desea consultar.

Programa de validación de estados y celdas que selecciona el usuario

Programa de validación de tres zonas (una correspondiente al Golfo de México, y las dos restantes para el Océano Pacífico) y las nueve direcciones que selecciona el usuario.

Mapas Interactivos

Se realizaron los siguientes mapas interactivos:

Mapa de gráficas	Este mapa estará dentro de la sección graficas del sitio WEB el cual contiene el mapa de México, donde se muestra de diferente color los estados para los cuales se realiza la modelación
Mapas individuales de cada uno de los estados en zona costera	Estos mapas están dentro de la sección graficas del sitio WEB, seleccionando el estado para el cual se requiera la consulta, mostrándose los municipios más importantes y las celdas que de acuerdo a la simulación pertenecen al estado.
Mapa de tres zonas	En este mapa esta dentro de la sección mapas del sitio WEB, este mapa esta dividido en tres zonas (una correspondiente al Golfo de México, y las dos restantes para el Océano Pacífico), en cada una de las zonas se muestra un menú emergente en el cual se podrá seleccionar la dirección de viento que se desee consulta, mostrándose la animación correspondiente a esa dirección

Tabla 3. Mapas interactivos

HTML

Se diseñó e implementó un sitio WEB de consulta restringida para mostrar el resultado de los mapas y graficas obtenidas de las simulaciones del modelo hidrodinámico utilizando las mallas Quadtree para el Golfo de México, Pacifico del Este y Caribe Mexicano.

6. Resultados

6.1 Inundaciones

Se obtuvo la información sobre inundaciones, área inundada, altura alcanzada por el tirante de agua, daños a ciudadanos y sus bienes y daños a infraestructura como: vías

de comunicación, zonas turísticas, fábricas, etc, de diferentes fuentes como a continuación se menciona. Un libro editado sobre inundaciones del estado de Veracruz con 20 capítulos que cubren los aspectos sociales y económicos, para el año del 2005 proporciona un recuento detallado de impactos físicos y emocionales. De la red de internet, se ha obtenido información en especial de la 'Red de Estudios Sociales para la Prevención de Desastres en Latinoamérica', elaborado y mantenido por el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS). Esta institución ha mantenido desde 1996 una base de reportes de desastres para todo el territorio nacional. El CIESAS ha alimentado esta base con el apoyo de diversos proyectos, incluyendo dos proyectos de LA RED; el original de "Inventarios de desastres en América Latina" y el proyecto IAI - LARED "Gestión de riesgos de desastres ENSO en América Latina".

Una fuente adicional de información sobre desastres es DesInventar México. Es una base de datos que agrupa información sobre desastres relacionados con eventos naturales y/o antropogénicos. Las fuentes de información son tres periódicos El Universal, Excelsior y La Jornada. Los reportes de desastres más frecuentes están asociados a inundaciones, incendios y epidemias. De esta información se escoge la relacionada a inundaciones costeras debidas a huracán. No siempre hay datos de altura del tirante de agua y área medida inundada, estos datos se tendrán que inferir de las cartas de topografía y basados en los nombres de las poblaciones inundadas y otros metadatos. Los datos se incluyen en el CD que acompaña a este informe.

6.2 Datos de caudales de ríos del banco de datos Bandas

Se cambiaron de formato los datos de caudales de ríos para la base de datos BANDAS. De formato *.dbf se pasó a formato ASCII para ser leídos con utilería de programación tipo Excel. Estos datos se usarán en las simulaciones de inundación en conjunto con programas simuladores de marea de tormenta. El mejor modelo de los que se están implementando se propondrá para su uso en forma operativa. IING-UNAM esta trabajando en el re-acondicionamiento de su modelo numérico de Marea de Tormenta para incluir el proceso de inundación con celdas que se humedecen y se secan. Previa negociación del Servicio Meteorológico Nacional el IMTA implementará el modelo SLOSH. Adicionalmente el modelo VOM, ya implementado al Golfo de México, se probará con vientos producidos por el modelo de atmósfera MM5. Los datos se incluyen en el CD que acompaña a este informe.

6.3 Batimetría mejorada

Se revisaron datos de batimetría proporcionados por la NOAA a USMN, resultaron ser los mismos que se encuentran en Internet con acceso libre. Su resolución es de 9-10 Km., demasiado burda para las necesidades del actual proyecto y en especial para la resolución del modelo MaTo del Instituto de Ingeniería UNAM. El IING-UNAM tiene acceso a una parte de la batimetría de la última campaña de la Secretaría de Marina (2006) con una mejor resolución y se está trabajando complementándola con imágenes de satélite Quickbird y un modelo digital de terreno de INEGI para adecuarla a los requerimientos de los modelos. Anexo C y CD que acompaña a este informe con los datos.

6.4 Adaptación del modelo numérico de Marea de Tormenta para incluir inundaciones

Los modelos (HURAC y MATO), ya tienen mas de cinco años en elaboración por el instituto de ingeniería de la UNAM y han sido validados en múltiples ocasiones en el litoral mexicano, Silva et al (2002). Se implementará también el modelo VOM al Golfo de México para ver si presenta ventajas sobre los modelos anteriores. Los resultados del sistema formado por estos modelos se compararán, dentro del marco de casos de estudio, con resultados equivalentes del modelo Slosh que actualmente se utiliza operacionalmente en EUA para la prevención de inundaciones. El modelo numérico MaTo del Instituto de Ingeniería UNAM, fue modificado para el manejo de celdas húmedas y secas, simulando la inundación de zonas costeras. Una descripción detallada se encuentra en el Anexo C.

El modelo MaTo se probó con vientos constantes para la costa de Tabasco. Para vientos de 20 nudos se obtuvo una elevación de 13 cm en la superficie del mar en la zona costera, Anexo A. Adicionalmente se homogeneizó la última información (2007) sobre las coordenadas mejoradas de las estaciones hidrométricas del BANDAS.

6.5 Identificación de huracanes para casos de estudio

Se realizó una búsqueda de huracanes que impactaron en México en la base de datos del NCH y de la NOAA. El criterio para realizar la base de datos fue que los huracanes impactaran una o dos veces en territorio nacional. Si el huracán impactó una vez se asignó a la categoría I y si fueron dos veces se asignó a la categoría II.

AÑO	NOMBRE	CATEGORIA	CLASE	DURACIÓN
-----	--------	-----------	-------	----------

Informe final proyecto CNA-CONACYT "CNA-2006-01-48639"

		HURACAN		
1960	ABBY	1	I	JUL 10-16
1961	ANNA	3	I	JUL 20-24
1966	INES	4	I	SEP 21-OCT 11
1967	BEULA	5	II	SEPT 5-22
1967	FERN	1	I	OCT 1-4
1969	LAURIE	2	II	OCT 17-27
1970	ELLA	3	II	SEP 7-13
1971	FERN	1	I	SEPT 3-13
1971	IRENE	1	II	SEPT 11-20
1972	AGNES	1	I	JUN 14-23
1973	BRENDA	1	II	AGO 18-22
1974	CARMEN	4	I	AGO 29- SEP 10
1975	CAROLINE	3	II	AGO 24- SEP 1
1975	ELOISE	3	I	SEP 13-24
1977	ANITA	5	I	AGO 29- SEP 3
1978	GRETA	4	I	SEP 13-20
1979	HENRI	1	I	SEP 15-24
1980	ALLEN	5	I	JUL 31- AGO 1
1983	BARRY	1	I	AGO 23-29
1988	DEBBY	1	I	AGO 31- SEP 8
1988	GILBERT	5	II	SEP 8-20
1990	DIANA	2	II	AGO 4-9
1993	GERT	2	II	SEP 14-21
1995	OPAL	4	I	SEP 27- OCT 6
1995	ROXANNE	3	I	OCT 7-21
1996	DOLLY	1	II	AGO 19-25
1996	LILI	3	I	OCT 14-29
1998	MITCH	5	II	OCT 22- NOV 9

1999	BRET	4	I	AGO 18-25
2000	GORDON	1	I	14-21 SEP
2000	KEITH	4	II	SEP 28- OCT 6
2001	IRIS	4	I	OCT 4-9
2002	ISIDORE	3	I	SEP 14-27
2003	CLAUDETTE	1	II	JUL 7-17
2003	ERIKA	1	I	AGO 14-17
2005	CINDY	1	I	JUL 3-11
2005	EMILY	5	II	JUL 11-21
2005	STAN	1	II	OCT 1-5
2005	WILMA	5	I	OCT 15-26
2007	DEAN	5	II	AGO 13-23
2007	FELIX	5	I	AGO 31- SEP 5
2007	LORENZO	1	I	SEP 25-28
2008	DOLLY	2	II	JUL 20-24

Tabla 2. Huracanes en el Atlántico Mexicano.

Para el Atlántico se encontraron 43 huracanes, de los cuales 26 impactaron una sola vez en territorio nacional mientras que 17 lo hicieron en dos ocasiones, ver Tabla 2 y Figura 2.

En el Pacífico, la base de datos obtenida fue de 32 huracanes. De ellos, 23 tocaron una vez suelo mexicano y los 9 restantes lo hicieron dos veces (Tabla 3 y Fig. 2).

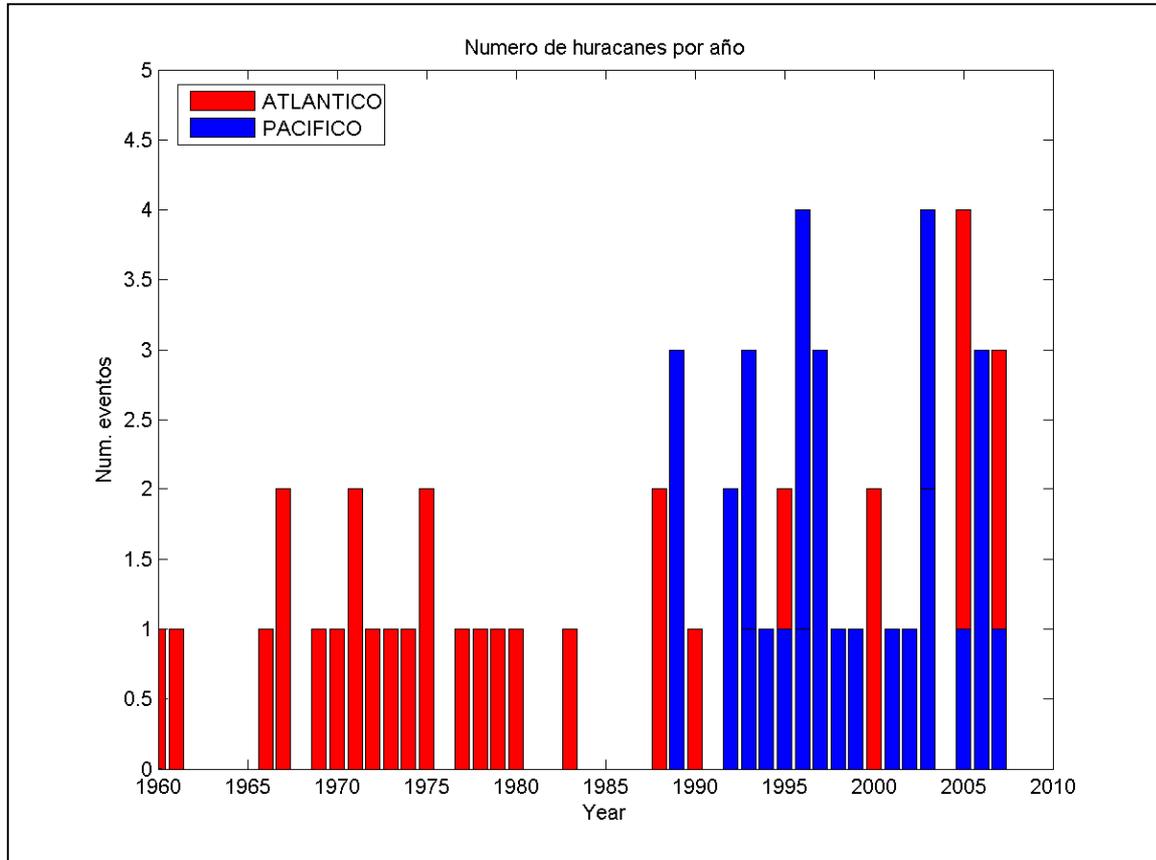


Tabla 2. Huracanes en el Atlántico Mexicano.

AÑO	NOMBRE	CATEGORIA HURACÁN	CLASE	DURACIÓN
1989	COSME	1	I	JUN 18-23
1989	KIKO	3	I	AGO 25-29
1989	RAYMOND	4	II	SEP 25- OCT 5
1992	VIRGIL	4	I	OCT 1-5
1992	WINIFRED	3	I	OCT 6-10
1993	CALVIN	2	I	JUL 4-9
1993	HILARY	3	II	AGO 17-27
1993	LIDIA	4	I	SEP 8-14

1994	ROSA	2	I	OCT 8-15
1995	ISMAEL	1	I	SEP 12-15
1996	ALMA	2	I	JUN 20-27
1996	BORIS	1	I	JUN 27- JUL 1
1996	FAUSTO	3	II	SEP 10-14
1996	HERNAN	1	I	SEP 30- OCT 4
1997	NORA	4	I	SEP 16-26
1997	PAULINE	4	I	SEP 16- OCT 12
1997	RICK	2	I	NOV 7-10
1998	ISIS	1	II	SEP 1-3
1999	GREG	1	I	SEP 5-9
2001	JULIETTE	4	II	SEP 21- OCT 3
2002	KENNA	5	I	OCT 22-26
2003	IGNACIO	2	I	AGO 22-27
2003	MARTY	2	II	SEP 18-26
2003	NORA	2	I	OCT 1-9
2003	OLAF	1	I	OCT 3-8
2004	JAVIER	4	II	SEP 10-20
2005	OTIS	2	I	SEP 28- OCT 5
2006	JOHN	4	I	AGO 28- SEP 4
2006	LANE	3	I	SEP 13-17
2006	PAUL	2	I	OCT 21-26
2007	HENRIETTE	1	II	AGO 30- SEP 6
2008	NORBERT	4	II	OCT 3-12

Tabla 3. Huracanes en el Pacífico Mexicano.

A continuación se ejemplifica, en la Tabla 3, una base de datos generada con la metodología y tecnología descrita para obtener las series de tiempo de las presiones mínimas de los ciclones tropicales mencionados en las tablas 1 y 2. Se agregan las tablas para tres huracanes más en el Apéndice C.

8.00	30.00	6.00	13.10	-95.90	1008.00	12.86
8.00	30.00	12.00	13.60	-96.50	1007.00	15.43
8.00	30.00	18.00	14.10	-97.20	1006.00	15.43
8.00	31.00	0.00	14.60	-98.00	1006.00	15.43
8.00	31.00	6.00	15.10	-98.80	1004.00	15.43
8.00	31.00	12.00	15.70	-99.60	1002.00	18.01
8.00	31.00	18.00	16.30	-100.60	1000.00	20.58
9.00	1.00	0.00	16.80	-101.60	997.00	23.15
9.00	1.00	6.00	17.20	-102.80	997.00	23.15
9.00	1.00	12.00	17.60	-103.90	997.00	23.15
9.00	1.00	18.00	17.90	-104.70	996.00	25.72
9.00	2.00	0.00	18.00	-105.30	995.00	25.72
9.00	2.00	6.00	18.10	-105.80	994.00	28.29
9.00	2.00	12.00	18.30	-106.20	994.00	28.29
9.00	2.00	18.00	18.50	-106.50	994.00	28.29
9.00	3.00	0.00	18.70	-106.80	993.00	28.29
9.00	3.00	6.00	19.00	-107.30	991.00	28.29
9.00	3.00	12.00	19.40	-107.90	988.00	30.87
9.00	3.00	18.00	19.80	-108.40	983.00	30.87
9.00	4.00	0.00	20.30	-108.70	978.00	30.87
9.00	4.00	6.00	20.90	-109.00	975.00	33.44
9.00	4.00	12.00	21.70	-109.30	972.00	38.58
9.00	4.00	18.00	22.60	-109.60	972.00	36.01
9.00	5.00	0.00	23.60	-109.80	975.00	33.44
9.00	5.00	6.00	24.60	-110.10	980.00	33.44
9.00	5.00	12.00	25.60	-110.40	983.00	33.44
9.00	5.00	18.00	26.60	-110.70	986.00	33.44
9.00	6.00	0.00	27.90	-110.90	990.00	30.87
9.00	6.00	6.00	29.50	-110.50	1002.00	15.43

Tabla 3. Huracán Henriete, 2007. Datos de columnas, de izquierda a derecha: mes, día, hora, latitud, longitud, presión mínima (mb), velocidad de viento (m/s).

Se obtuvieron gráficas que describen la serie de tiempo de las presiones mínimas a lo largo de la trayectoria del huracán. Cabe recordar que los datos vienen a cada seis horas. En este reporte se verá el ejemplo de cuatro huracanes.

El primer huracán que veremos es el Roxanne, éste ocurrió en el Atlántico del 7 al 21 de Octubre. A este huracán se le ha catalogado como Clase I debido a que impactó en nuestro país una sola vez. Roxanne se originó en el Caribe, cruzó la península de Yucatán y retomó fuerza en la Sonda de Campeche, permaneciendo po lo menos

cinco días en la zona, a unos 200 km de distancia de Ciudad del Carmen, Campeche (Fig. 1).

Este huracán afectó, principalmente, los estados de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco y Veracruz (Palacio, 1999).

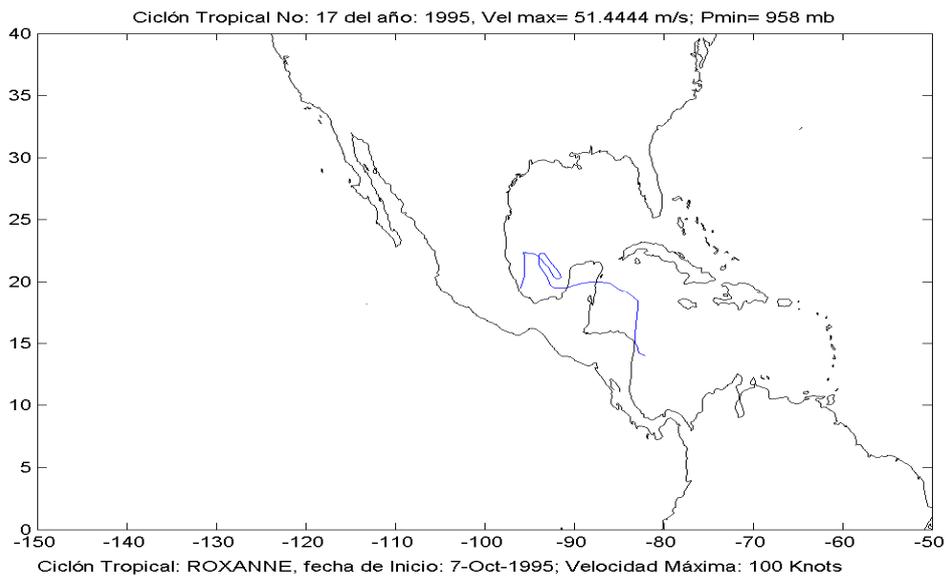


Fig.

1. Trayectoria del huracán Roxanne.

La presión mínima registrada de este huracán fue de 958 milibarios el 11 de Octubre a las 0 horas, mientras que la velocidad máxima de vientos fue de 51.44 m/s ese mismo día y hora. Las coordenadas de ese punto fueron de 20° latitud Norte y 87° Longitud Oeste (Fig. 2).

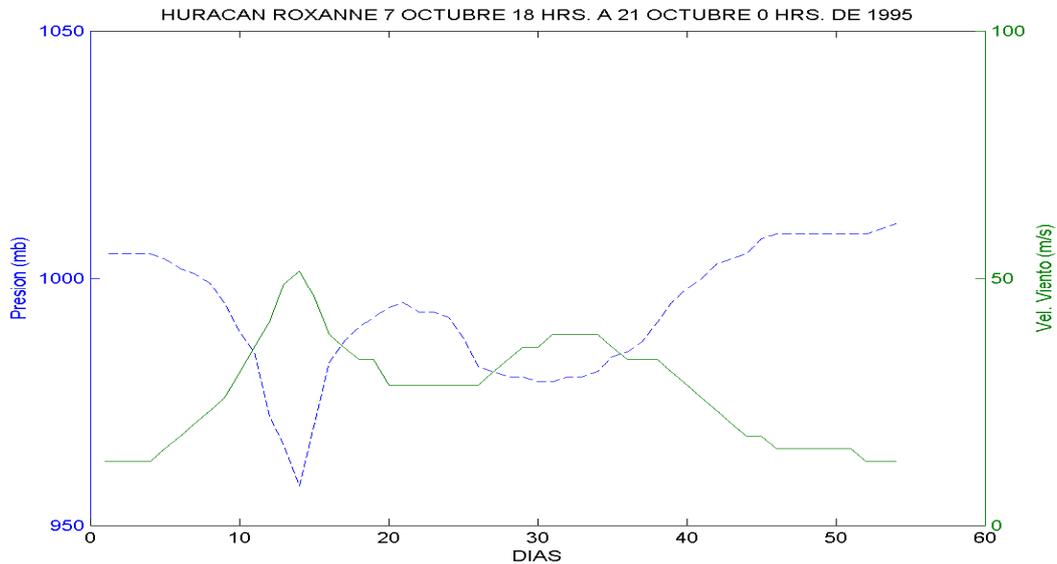


Fig.

2. Serie de tiempo de las presiones mínimas y velocidad de viento del huracán Roxanne.

Otro huracán que se tiene como ejemplo es Emily y Wilma, que ocurrieron del 11 al 21 de Julio y del 15 al 26 de Octubre, respectivamente, del año 2005.

El huracán Emily se coloca en la Clase II, ya que impactó en dos ocasiones en las costas de nuestro país (Fig. 3). El primer punto de tierra que tocó fue en las inmediaciones de Tulum, Quintana Roo como categoría IV de la escala Saffir-Simpson. Emily continuó su desplazamiento al Este de Valladolid en el Oriente del estado de Yucatán como categoría II. Retornó al mar en el Golfo de México como categoría I.

Para el día 18 establece zona de alerta roja desde Cabo Rojo, Veracruz hasta Matamoros, Tamaulipas. Para el día 20, el huracán vuelve a tocar tierra entre las poblaciones de El Mezquite y Carboneras, del municipio de San Fernando, Tamaulipas. Más tarde avanzó debilitándose por Villa de Méndez, Tamaulipas, Monterrey, Nuevo León y disipándose al sur de Saltillo, Coahuila (Hernández, 2005).

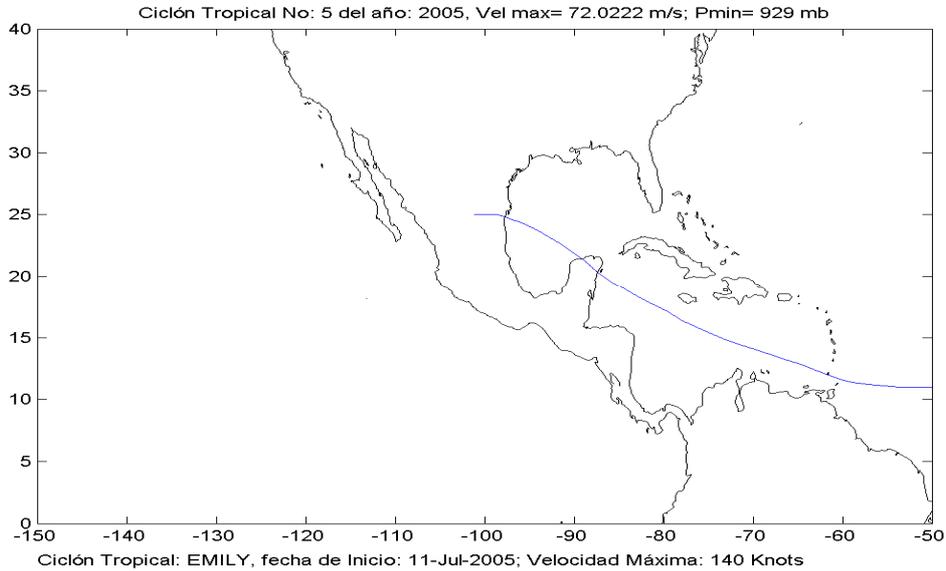


Fig.

3. Trayectoria del huracán Emily.

En Emily la presión mínima registrada fue de 929 milibarios y la velocidad de vientos máxima fue de 72.02 m/s el día 17 de Julio de 2005, registrado a las 0 hrs. La posición geográfica de estos datos fue en 17.01° Latitud Norte y 79.5° Longitud Oeste (Fig. 4).

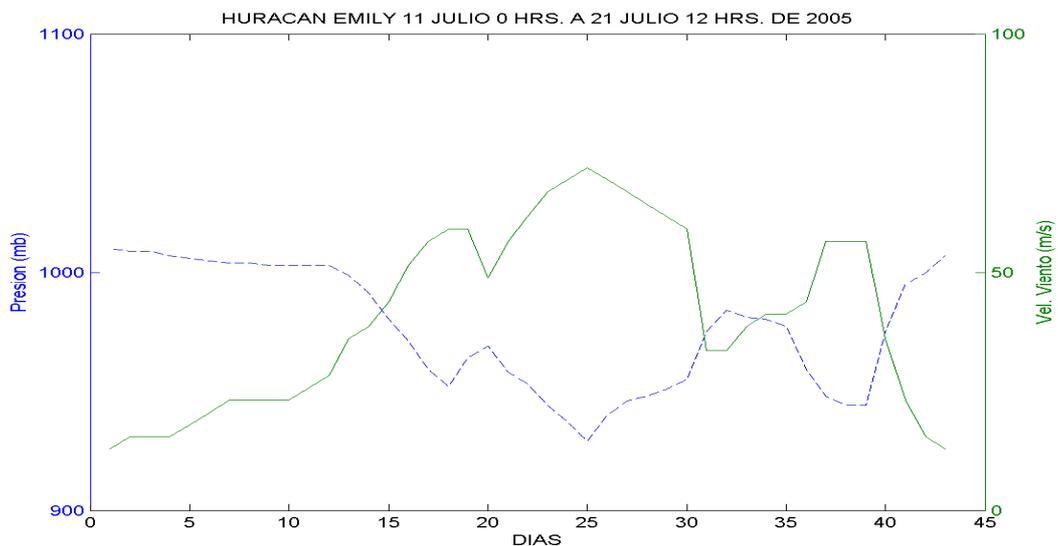
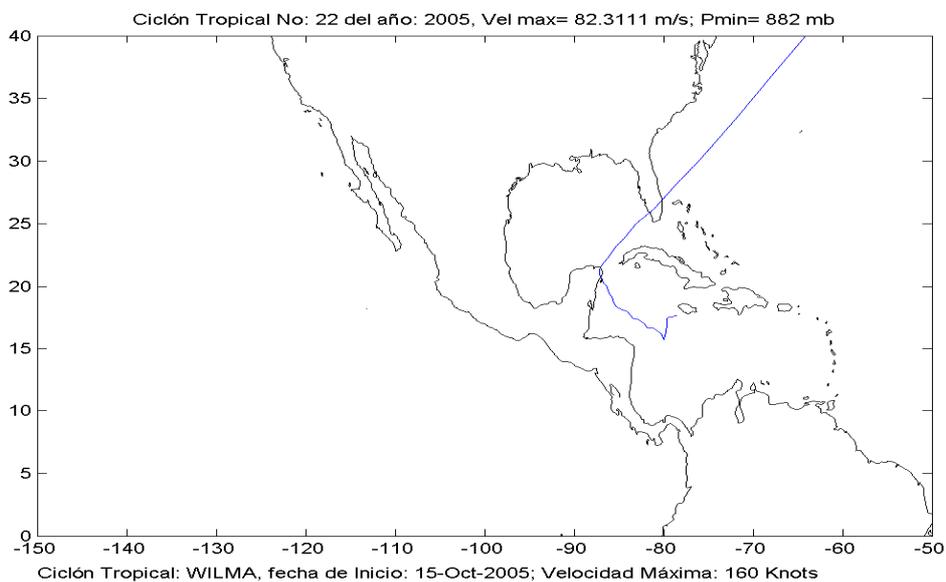


Fig.

4. Serie de tiempo de las presiones mínimas y velocidad de viento del huracán Emily.

Tenemos también al huracán Wilma, que tocó tierra el 21 de octubre en la península de Yucatán como un poderoso huracán categoría 4. el ojo del huracán pasó primero por la Isla de Cozumel, antes de tener su primer contacto "oficial" sobre la península cerca de Playa del Carmen, en el estado de Quintana Roo (Fig. 4). El ojo se movió lentamente hacia el norte, pasando justo al oeste de Cancún (Tun, 2005)



5. Trayectoria del huracán Wilma.

Fig.

Al huracán Wilma se asignó en la Clase I. Durante su trayectoria se registró una presión mínima de 924 milibarios y una velocidad de vientos máxima de 66.88 m/s el día 21 de octubre de 2005 a las 0 hrs. Las coordenadas geográficas fueron 19.10° Latitud Norte 85.8° Longitud Oeste (Fig. 5).

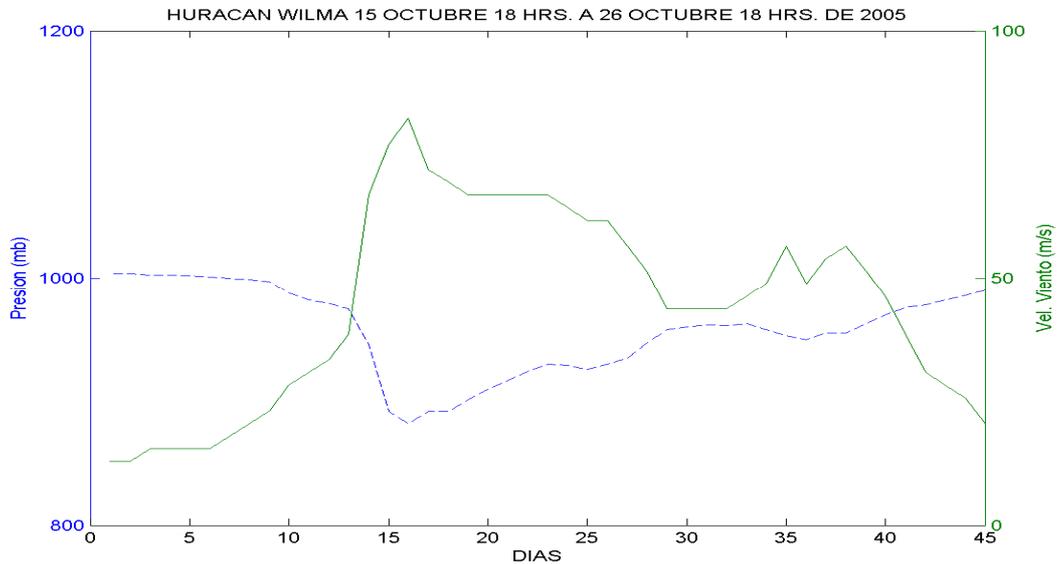


Fig.

6. Serie de tiempo de las presiones mínimas y velocidad de viento del huracán Wilma.

Para el Océano Pacífico tenemos el ejemplo del huracán Henriette, al cual colocamos en la Clase II debido a que impactó en dos ocasiones en costas Mexicanas. El primer impacto ocurrió el 4 de septiembre en el Sur de la península de Baja California, Henriette alcanzó la categoría 1. Enseguida regresa al mar, en el Sur del Golfo de California, con desplazamientos hacia el Norte. Impactando por segunda vez en las inmediaciones de Guaymas, Sonora (Fig. 7). Henriette se degrada a tormenta tropical para el 5 de septiembre y continúa avanzando, ya como baja presión, hacia la zona fronteriza de Sonora y Arizona (Hernández, 2007).

El huracán Henriette registró una velocidad de viento máximo de 38.58 m/s, mientras que la presión mínima fue de 972 milibarios, esto para el día 4 de Septiembre de 2007 a las 12 hrs. En la posición 21.7° Latitud Norte 109.3° Longitud Oeste (Fig. 8).

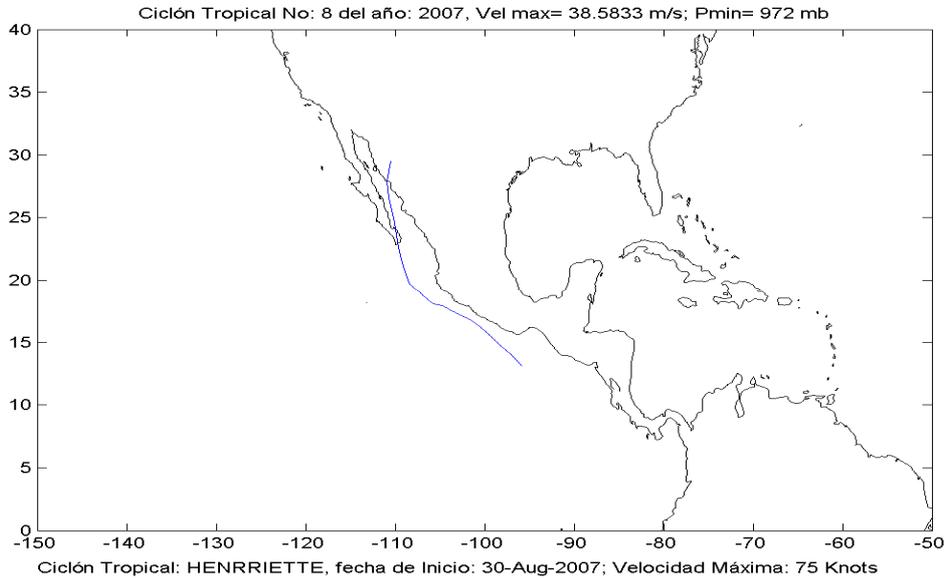


Fig.

7. Trayectoria del huracán Henriette.

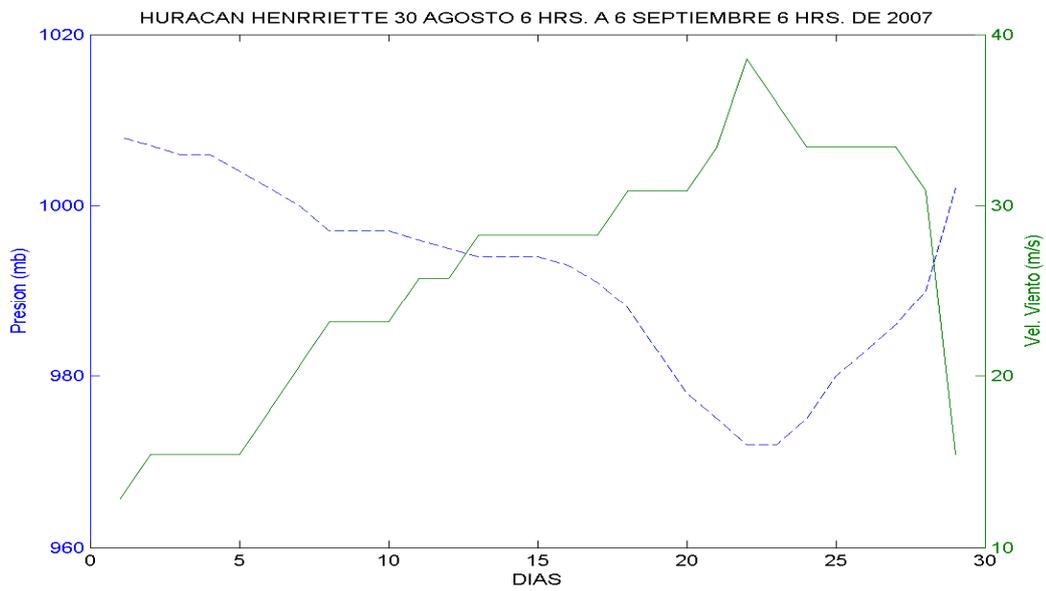


Fig.

6. Serie de tiempo de las presiones mínimas y velocidad de viento del huracán Henriette.

6.6 Validación del modelo HURAC

La validación de los resultados obtenidos por el modelo híbrido HURAC, se realizó mediante la comparación con los datos recuperados de diversas fuentes y los resultados del modelo arrojados por el modelo durante el paso del huracán Wilma. Así, en la Figura 16 se presenta la validación para los valores de presión atmosférica estimados, al compararlos con los registrados por la boya 42056 de la NOAA (lado izquierdo) y la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional en Cozumel (lado derecho). La precisión en la aproximación es evidente, aunque es de notar que el modelo se aleja un poco de los datos medidos una vez que se ha superado el pico de la tormenta y durante el proceso de decaimiento.

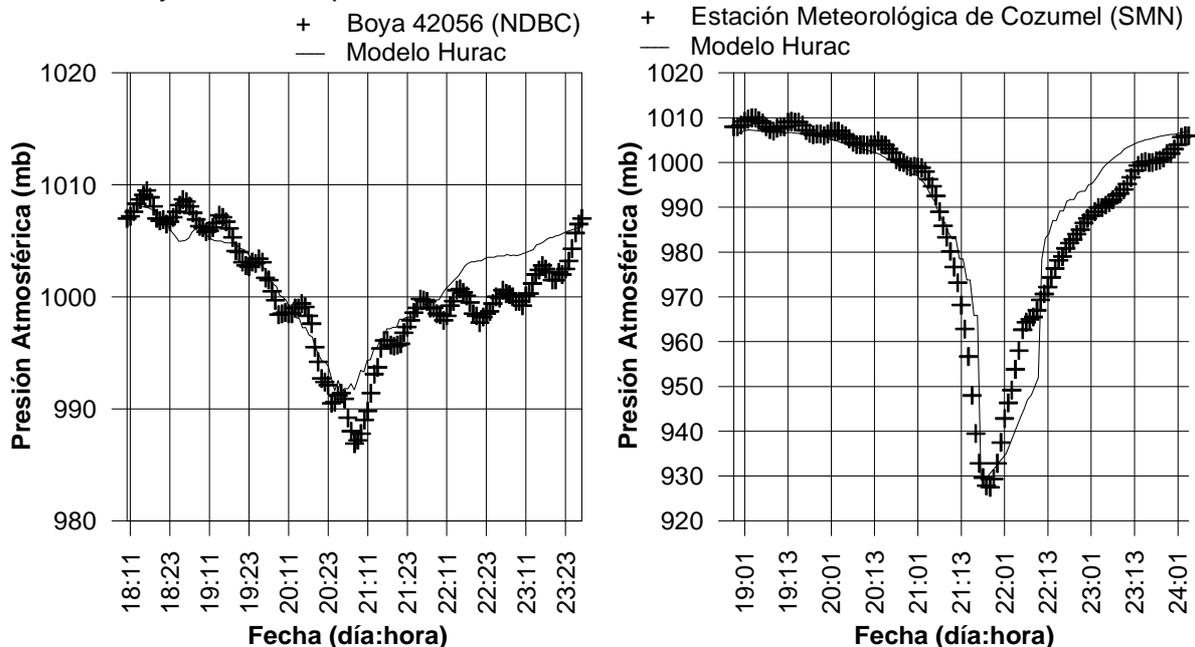


Figura 16 Comparación entre las presiones atmosféricas calculadas con el modelo híbrido versus registros de la boya 42056 del NDBC y del SMN en la Isla de Cozumel durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005).

Respecto del campo de viento, la Fig. 5 muestra la comparación entre los datos obtenidos frente a Puerto Morelos, Quintana Roo y las estimaciones del modelo híbrido. Es claro que, salvo por algunos puntos, el ajuste entre ambas fuentes de información es razonablemente bueno.

6.7 Generación de una base de datos de vientos

Con el propósito de alcanzar una resolución adecuada para caracterizar los litorales mexicanos, los vientos del NCEP/NCAR fueron interpolados hasta obtener una resolución espacial de la información de 0.5 de grado a intervalos de una hora. El procedimiento llevado a cabo para efectuar la hibridación se describe a continuación:

Para la utilización del modelo HURAC se identificaron los ciclones tropicales que afectaron las áreas de estudio obtenidos del National Hurricane Center (NHC). Para la vertiente atlántica se consideraron 646 eventos, mientras que para la vertiente pacífica fueron 838 eventos. Estos datos se interpolaron para obtener la ubicación geográfica y la presión central cada hora. Posteriormente, se ejecutó el modelo HURAC, limitando su aplicación a un radio de 500 Km. medidos desde el centro del meteoro, obteniendo para todos los nodos de la malla un registro discontinuo en el tiempo de los datos de viento y oleaje en condiciones extremas.

Finalmente los datos del NCEP/NCAR fueron sustituidos por los resultados que arrojó el HURAC en las fechas correspondientes a la afectación de cada uno de los ciclones, cuando al hacer la comparación los valores del viento fueran diferentes de cero, Figura 18.

En la verificación de la información de la boya y del modelo híbrido, se detectan algunas interrupciones en los datos que proporcionan las boyas. Esta pérdida de información suele deberse a fallas técnicas propias de los instrumentos de medición; aunque en determinados casos, las fechas en que se presentó la suspensión de la información, coinciden con los días en los cuales alguna tormenta o huracán pasó cerca de la boya, de donde la falta de datos podría también ser resultado de saturación del equipo.

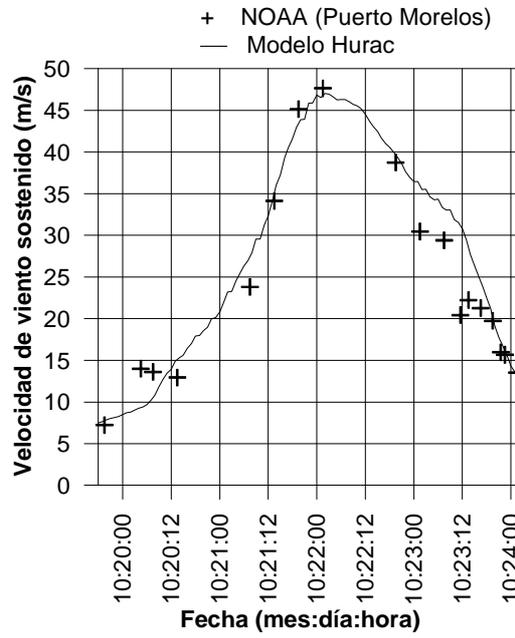


Figura 17 Comparación de los vientos calculados con el modelo híbrido y los datos estimados por el proyecto HRD durante el paso del huracán Wilma (octubre de 2005)

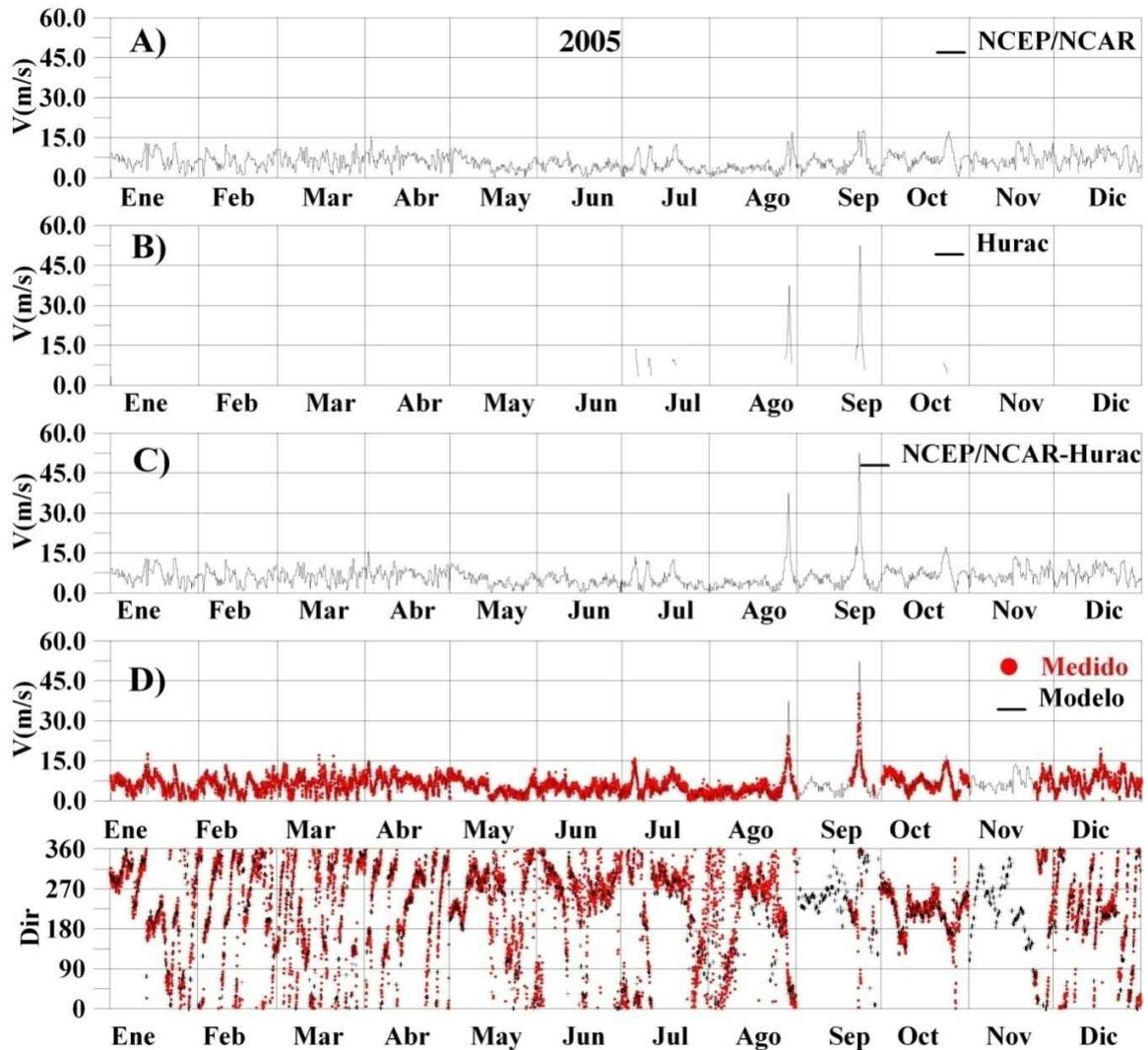


Figura 18 Esquematización de la metodología empleada para el punto ubicado en la coordenada (89.5° W, 26° N). A) Datos del NCEP/NPCAR, B) resultados del modelo Hurac, C) resultados con el modelo híbrido y D) comparación del viento medido (velocidad y dirección) en la boya 42001 versus resultados del modelo.

6.8 Resultados de la aplicación del modelo de marea de tormenta

El objetivo c) y d) se inició mediante con escenarios preliminares que a la vez sirvan como análisis de sensibilidad, se ha realizado una primera serie de ejecuciones del modelo identificando las zonas susceptibles de inundación a través del cálculo de la sobre-elevación del nivel medio del mar obtenida como resultado de vientos de carácter ciclónico. Para tal efecto se utilizaron las batimetrías que se describieron en la sección anterior y el mecanismo de forzamiento consistió en un viento de magnitud y dirección constante, tal como se reflejaría durante las horas de afectación de un evento ciclónico extraordinario que afectara las zonas de detalle en que se ha dividido la costa mexicana. Para cada uno de dichos dominios de detalle se están ejecutando diferentes condiciones de viento a fin de representar, en magnitud, la ocurrencia de tormentas y huracanes.

La 8 muestra un ejemplo de los resultados que se obtienen de las ejecuciones recién descritas para el caso específico de la región de detalle que incluye a la isla Cozumel. En ella se puede observar las zonas de mayor vulnerabilidad ante inundación por viento de carácter ciclónico con dirección Este y magnitud de 70 km/h (Tormenta Tropical).

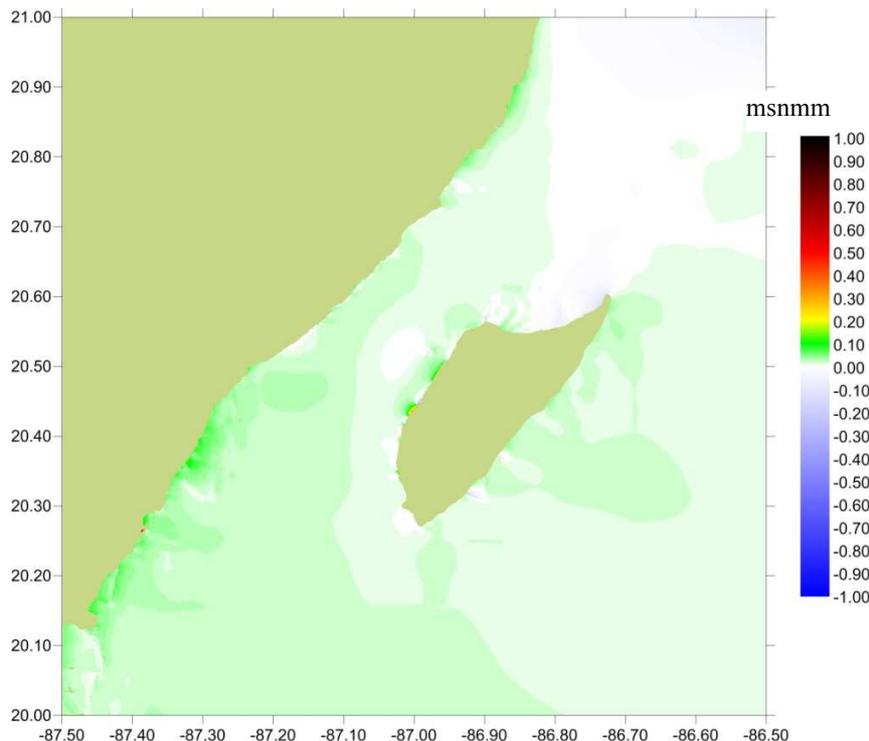


Figura 19 Sobre-elevación del nivel del mar debido a una tormenta tropical en la región Cozumel

La figura 9 presenta el resultado para la misma región de detalle que el caso anterior, pero la intensidad del viento ahora corresponde a 120 km/h (Huracán Clase 2). La mayoría de las regiones de detalle se están ejecutando una vez que se ha comprobado que los resultados que se obtienen son aceptables.

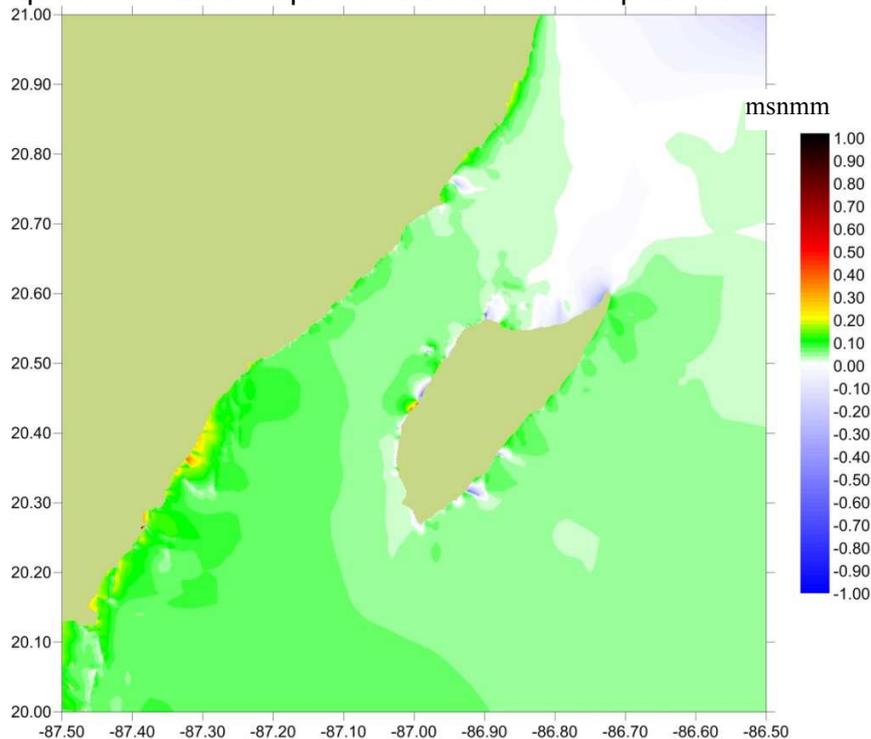


Figura 20 Sobre-elevación del nivel del mar debido a un huracán clase 2 en la región Cozumel

La mayoría de las regiones de detalle se están ejecutando una vez que se ha comprobado que los resultados que se obtienen son aceptables.

Se presentan como muestra sólo las simulaciones de dos huracanes: Isidore (2002) y (Wilma, 2005), cada uno corresponde a dos sub-regiones, lo anterior con el objetivo de obtener resultados por zonas:

Litoral de Quintana Roo – Litoral norte de Yucatán
Litoral de Campeche

Para el primera región se simuló el huracán Wilma (2005), para la segunda el Huracán Isidore (2002). Para le región de Campeche se han obtenido resultados de la superficie libre en el orden de magnitud que se observaron con en campo con la presencia del huracán Isidoro. Para el caso de la malla numérica utilizada para valorar los escenarios de inundación en el litoral de Yucatán-Quintana Roo utilizando las condiciones de forzamiento del Huracán Wilma, el valor de superficie libre obtenido ha

sido menor al esperado, lo anterior está obligando a utilizar mallas numéricas con mayor resolución espacial y por ende mayor esfuerzo computacional. Actualmente se están realizando las primeras pruebas de modelación de todo el Golfo de México y Mar Caribe, se espera obtener para finales del mes de junio los primeros resultados.

Litoral de Quintana Roo – Litoral Norte de Yucatán

Se simuló el huracán Wilma, sobre la malla que se detalla en la figura 10. El cual tuvo una duración de 227 h, En la figura 11 se presentan los resultados de sobrelevación de la superficie libre para cuatro instantes de tiempo diferentes.

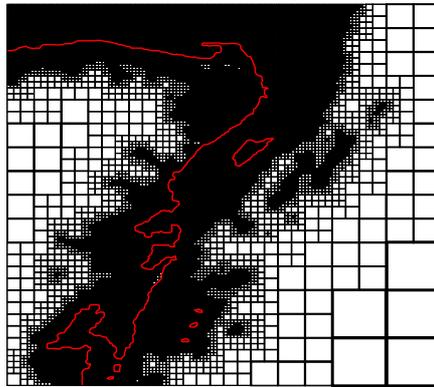


Figura 10. Malla QT para el litoral de Quintana Roo

En la figura 12 se presenta la variación temporal de la superficie libre para una celda ubicada entre Cancún e Isla Mujeres, se observa que el máximo valor fue de 1.85 m,

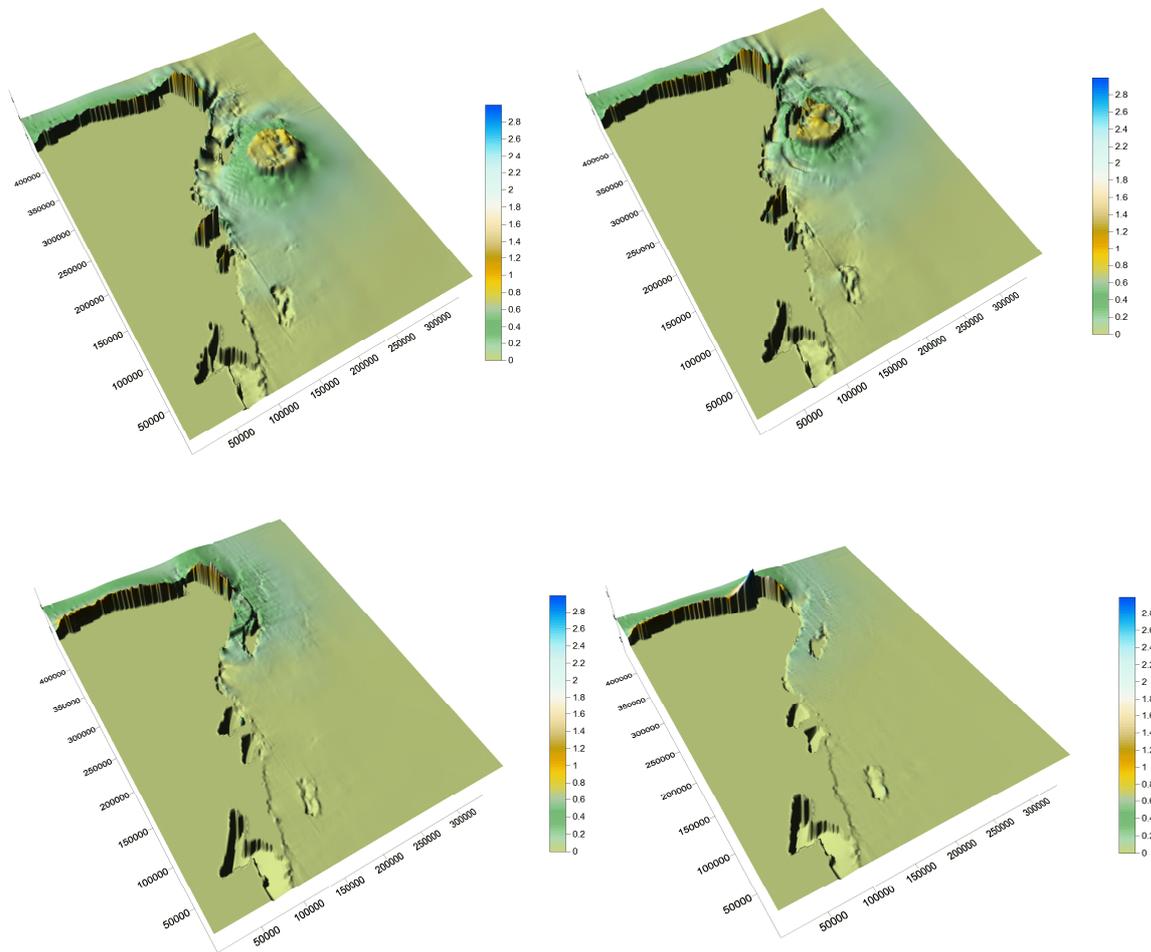


Figura 11. Sobre elevación en los instantes de tiempo 100 h, 108 h, 122 h y 135 h

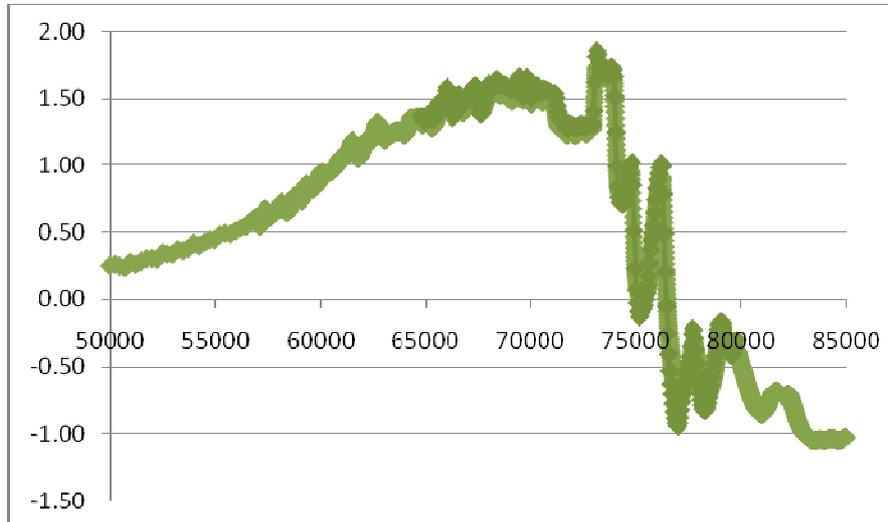


Figura 12. Variación temporal para una celda ubicada en el canal Isla-Mujeres, Cancún

Figura 13. Resultados de inundación con una malla de alta resolución para la zona de Cancún. La escala de colores está en metros.

Litoral de Campeche

En la figura 14 se presenta la malla utilizada para modelar nortes y huracanes en el Litoral de Campeche. Se presenta a continuación los valores de la superficie libre obtenidos para dos tipos de eventos extremos que se han presentado en el estado, el primero es un viento "norte" con dirección constante norte-sur con magnitud de 80 km/h, que actúa durante 24 horas, Figura 15, el máximo valor puntual que se presenta es de 1.8 m, en promedio la máxima sobrelevación es de 1.2 m.

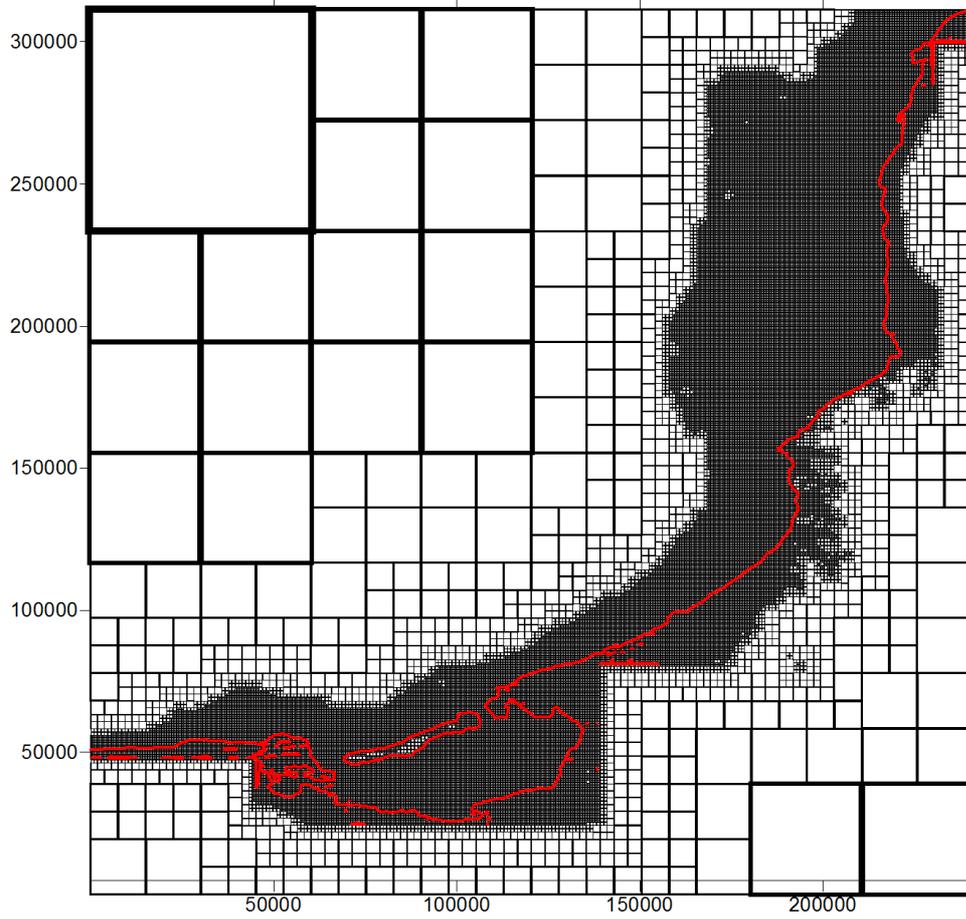


Figura 14. Malla QT para el litoral del Estado de Campeche

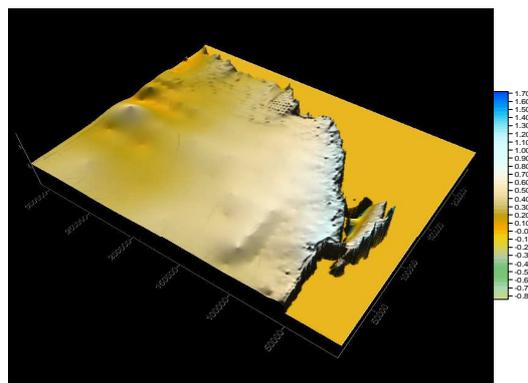


Figura 15. Superficie libre estable para un viento norte de 80 km/h

El segundo caso que se indica es el huracán Isidore que afectó el estado en el año 2002, aunque las mayores afectaciones debidas a este huracán fueron por lluvia, la marea astronómica también fue importante. La duración real del evento que se simuló fue de 8 días y 19 horas, que fue equivalente a 2 días y medio de modelación en computador,

En las Figura 16 se presentan tres instantes de la modelación, la parte superior cuando está en ascenso la marea astronómica (máximo de 85 cm), En la parte central se presenta en el máximo (3.1 m en la parte norte del estado y; en la ciudad de San Francisco de Campeche la marea de tormenta estuvo cercana a 2.0 m sobre el nivel medio del mar) y parte inferior cuando el huracán ya se está alejando de las costas de Campeche.

En la Figura 17 se muestra la evolución temporal de la superficie libre en cercanías de la ciudad de San Francisco de Campeche. En la Figura 18 se muestra la variación temporal de la superficie libre en Isla Arena, al norte del estado de Campeche, se observa que el máximo presentado es de 1.75 m, en la metodología para la elaboración de mapas de riesgo por marea de tormenta propuesta: Caso Isla Arena, Municipio de Calkiní Campeche elaborada por el CENAPRED, este valor es de 1.70 m (Huracan Clase II), lo cual permite concluir que la metodología que se aplicará para el mapa de marea de tormenta es coherente con resultados presentados por otros autores, con la gran ventaja es que permite conocer el comportamiento general (velocidades y superficie libre) para cualquier punto de la línea de costa para cualquier evento hidrometeorológico extremo.

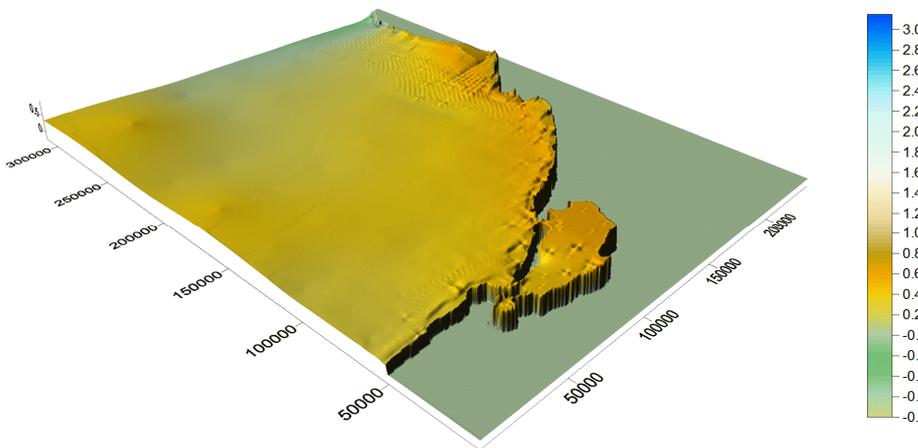
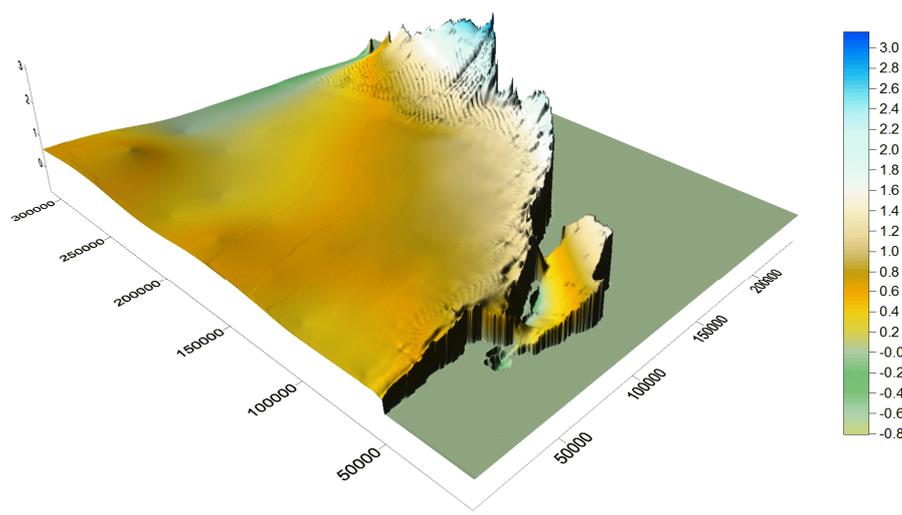
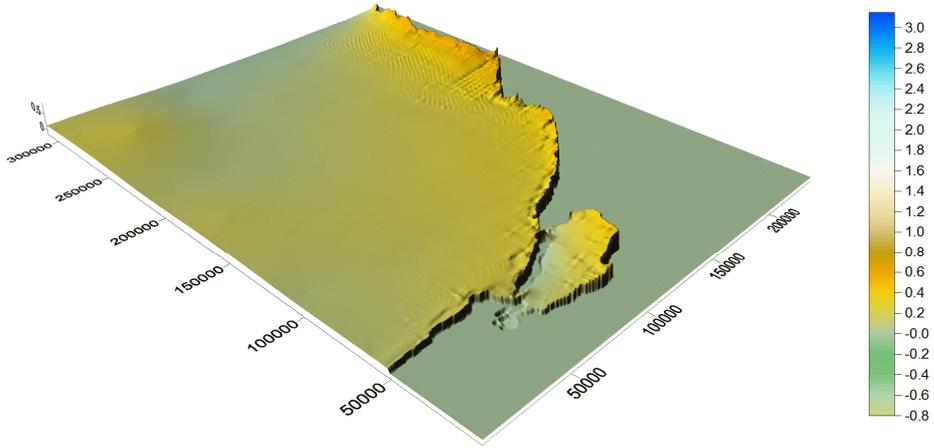


Figura 16. Superficie libre en el litoral de Campeche para tres instantes del huracán Isidore

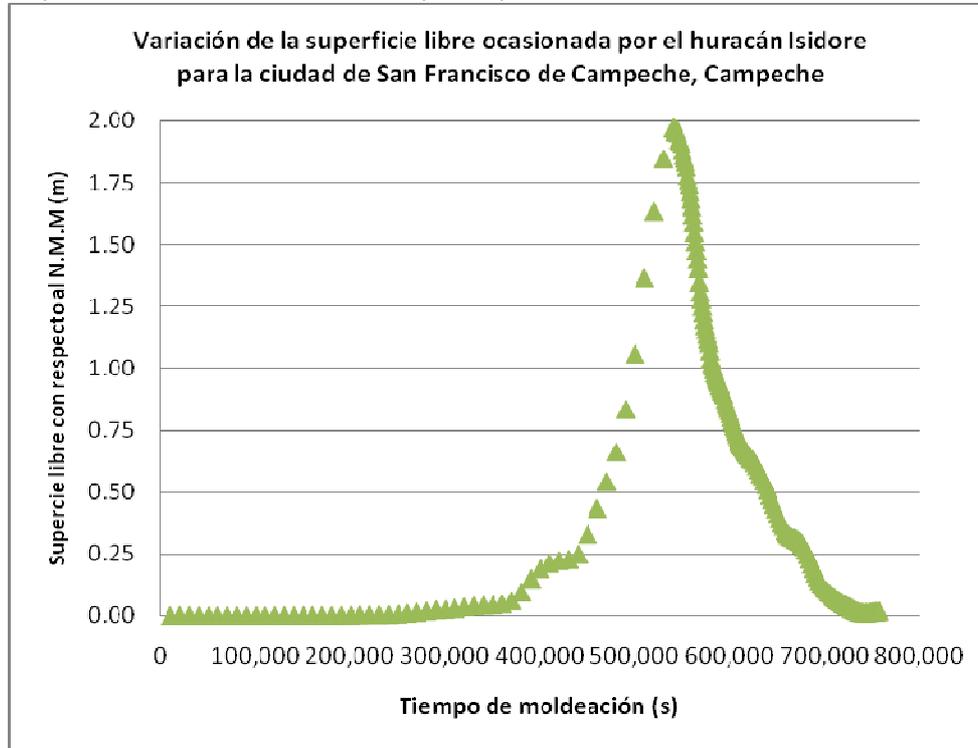


Figura 17. Evolución temporal de la superficie libre debido al huracán Isidore para una celda cercana en el puerto de San Francisco de Campeche

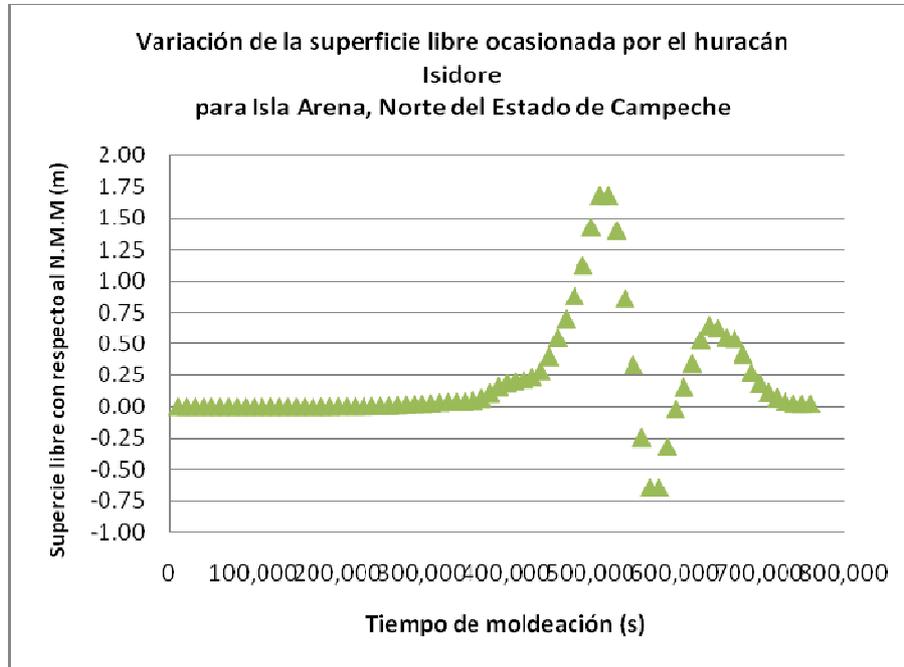


Figura 18. Evolución temporal de la superficie libre debido al huracán Isidore para Isla Arena, Calkiní, Campeche

6.9 Despliegue de resultados dinámicamente en página WEB.

La variación del nivel medio del mar asociado a la marea de tormenta fue estimada mediante simulaciones numéricas, las cuales fueron forzadas por velocidades observadas mediante seis intensidades de viento de nueve direcciones actuando en las costas de la República Mexicana. Las mallas se generaron para tres grandes regiones: Golfo de México, Caribe Mexicano y Océano Pacífico del Este (costas mexicanas).

Las siguientes tablas y figura muestran las direcciones y velocidades con las cuales se forzó el modelo de marea de tormenta, generando resultados gráficos.

Tabla 1. Direcciones de viento forzante.

No	Sigla	Nombre del Polo	Dirección Modelada	Procedencia del viento
1	E	Este	180.0	Viento proveniente del Este
2	ENE	Este Noreste	202.5	Viento proveniente del Este Noreste

3	NE	Noreste	225.0	Viento proveniente del Noreste
4	NNE	Norte Noreste	247.5	Viento proveniente del Norte Noreste
5	N	Norte	270.0	Viento proveniente del Norte
6	NNO	Norte Noroeste	292.5	Viento proveniente del Norte Noroeste
7	NO	Noroeste	315.0	Viento proveniente del Noroeste
8	ONO	Oeste Noroeste	337.5	Viento proveniente del Oeste Noroeste
9	O	Oeste	360.0	Viento proveniente del Oeste

Tabla 2. Direcciones de viento forzante para El Pacífico, tanto Norte como Sur.

No	Sigla	Nombre del Polo	Dirección Modelada	Procedencia del viento
1	O	Oeste	0	Viento proveniente del Oeste
2	OSO	Oeste Suroeste	22.5	Viento proveniente del Oeste Suroeste
3	SO	Suroeste	45	Viento proveniente del Suroeste
4	SSO	Sur Suroeste	67.5	Viento proveniente del Sur Suroeste
5	S	Sur	90	Viento proveniente del Sur
6	SSE	Sur Sureste	112.5	Viento proveniente del Sur Sureste
7	SE	Sureste	135	Viento proveniente del Sureste
8	ESE	Este Sureste	157.5	Viento proveniente del Este Sureste

Tabla 3. Direcciones de viento forzant para el Caribe.

No	Sigla	Nombre del Polo	Dirección Modelada	Procedencia del viento
1	SSE	Sur Sureste	112.5	Viento proveniente del Sur Sureste
2	SE	Sureste	135	Viento proveniente del Sureste
3	ESE	Este Sureste	157.5	Viento proveniente del Este Sureste
4	E	Este	180	Viento proveniente del Este
5	ENE	Este Noreste	202.5	Viento proveniente del Este Noreste
6	NE	Noreste	225	Viento proveniente del Noreste

Tabla 4. Direcciones de viento forzant para el Golfo de México.

No	Sigla	Nombre del Polo	Dirección Modelada	Procedencia del viento
1	E	Este	180	Viento proveniente del Este
2	ENE	Este Noreste	202.5	Viento proveniente del Este Noreste
3	NE	Noreste	225	Viento proveniente del Noreste
4	NNE	Norte Noreste	247.5	Viento proveniente del Norte Noreste
5	N	Norte	270	Viento proveniente del Norte
6	NNO	Norte Noroeste	292.5	Viento proveniente del Norte Noroeste

7	NO	Noroeste	315	Viento proveniente del Noroeste
8	ONO	Oeste Noroeste	337.5	Viento proveniente del Oeste Noroeste
9	O	Oeste	360	Viento proveniente del Oeste

Tabla 5. Intensidades de viento forzante.

V (N/m ²)	V (Km/h)
1	63
2	90
3	108
4	126
5	144
6	155

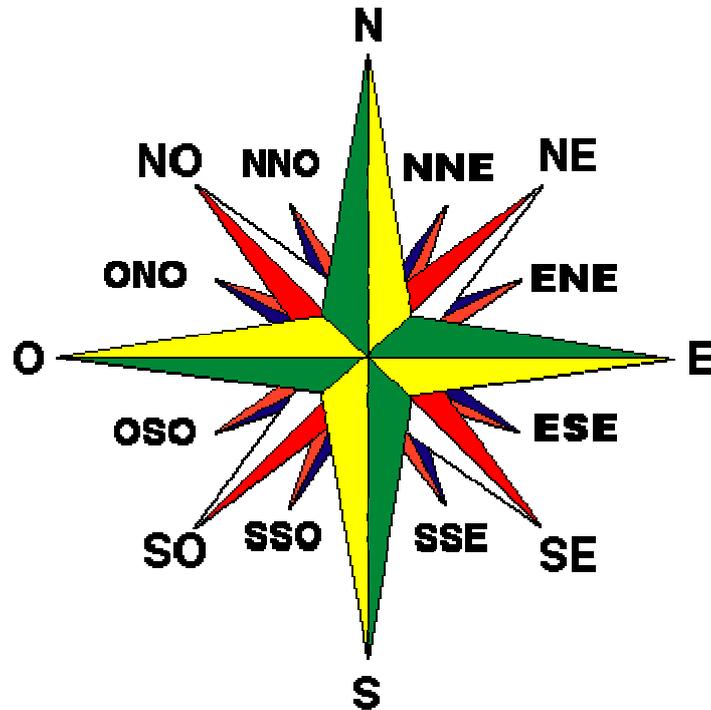


Figura 4. Direcciones de viento forzante.

Para cumplir con los objetivos de la orden de servicio, primero se obtuvo el número de celda de la malla Quadtree, para la cual se obtendría la información requerida para la realización de las graficas y mapas.

Para ello, se tomo el criterio que la celda, tendría una diferencia de 10 kilómetros de distancia entre ellas.

La Figura 5 muestra un mapa con los puntos (números de celda), utilizados para el golfo de México y la zona del Pacífico.

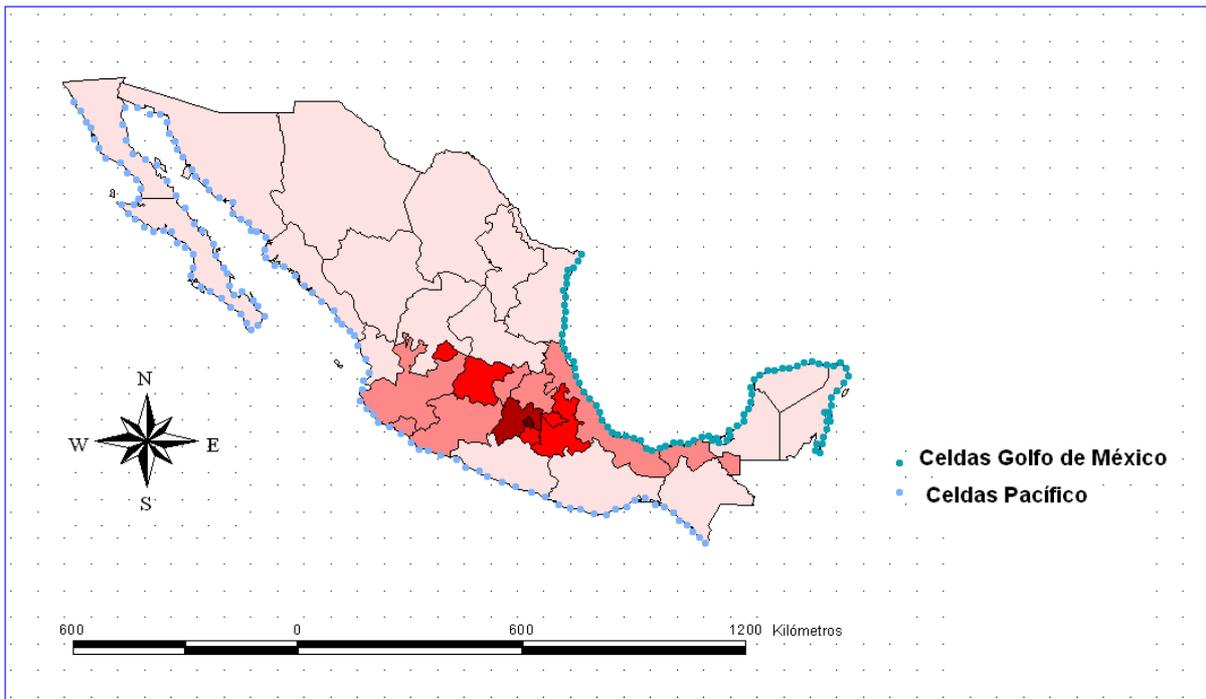
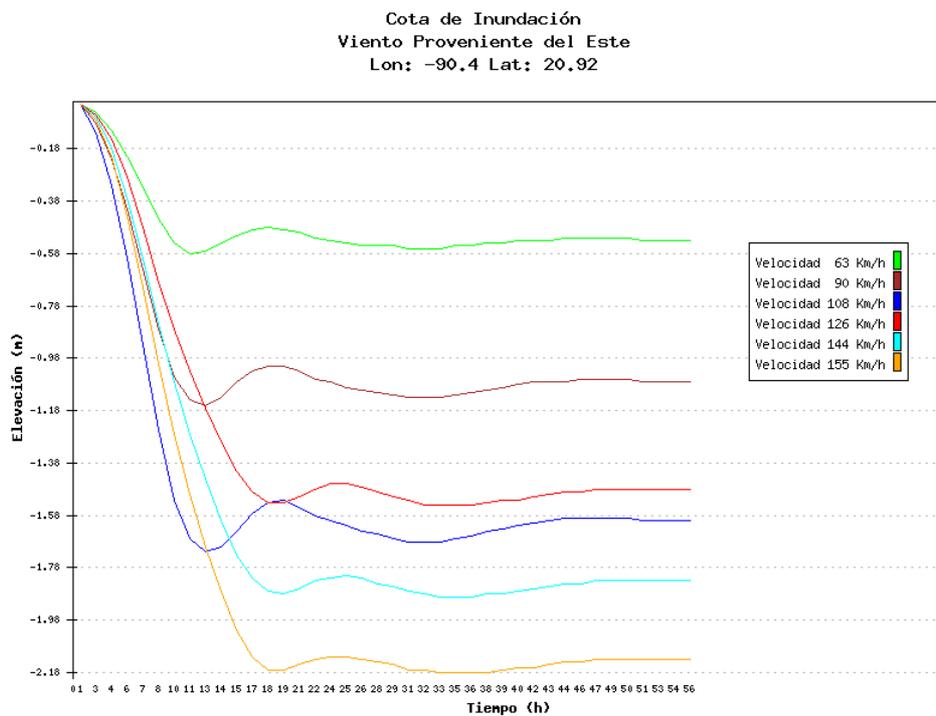
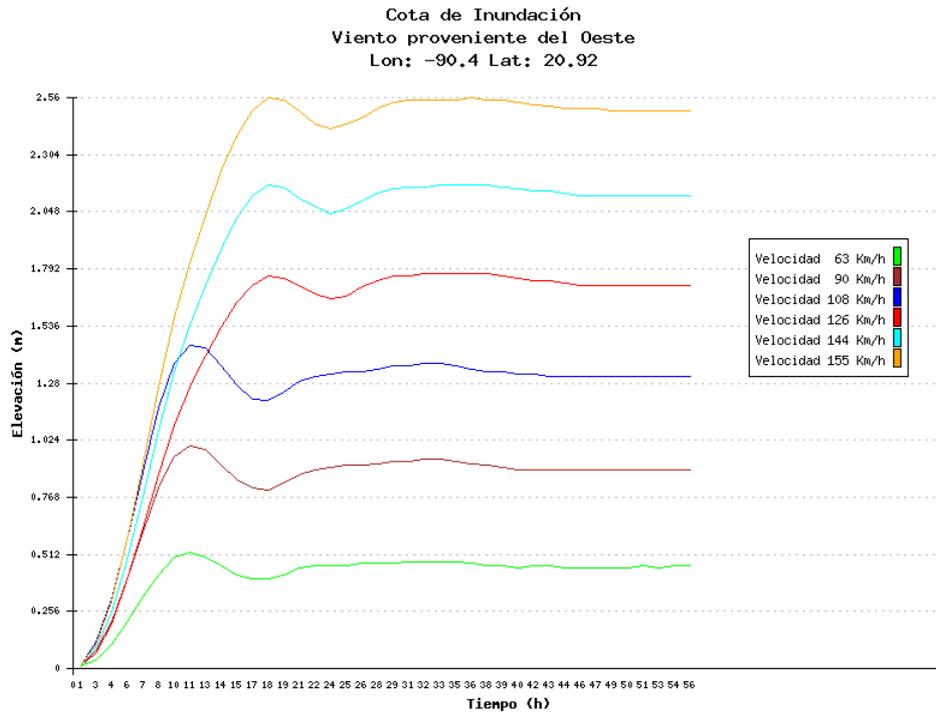


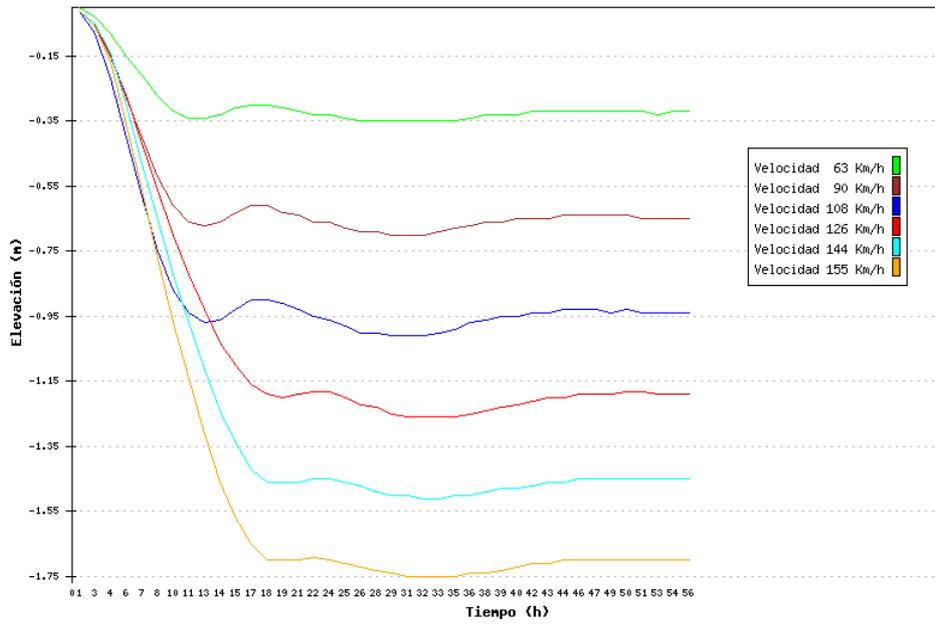
Figura 5. Visualización de los números de celda en la república Mexicana

Con esta información se realizaron las graficas para cada una de las nueve direcciones en sus seis velocidades, esto se hizo con ayuda del software Grapher y con ayuda de Arc View.

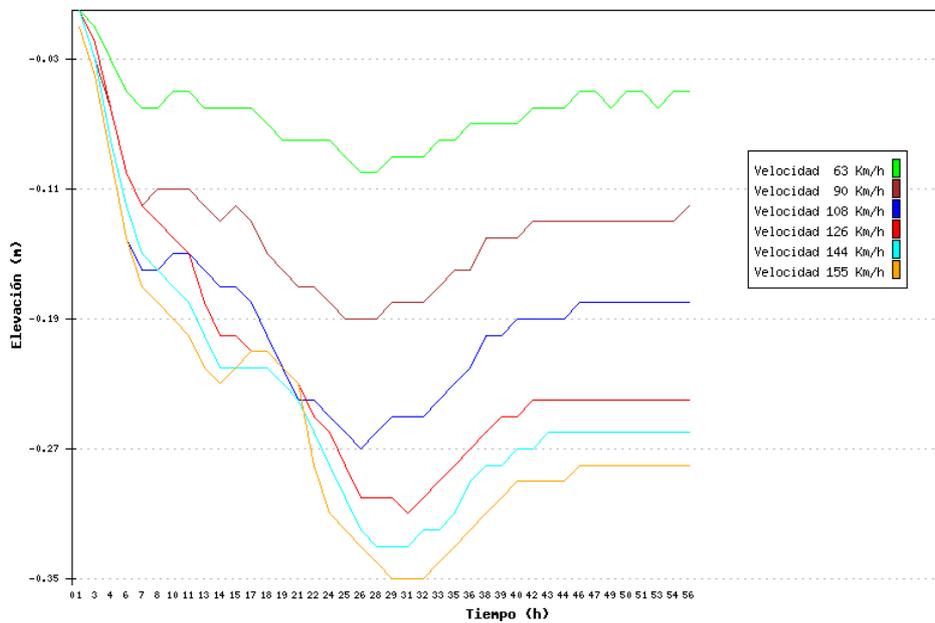
A continuación se muestran 27 ejemplos del tipo de imágenes realizadas para el golfo de México en grupos de 8 figuras (de Fig. 6 a Fig. 14). Esta información fue extraída de las simulaciones numéricas, desplegando como ejemplo las 95 zonas geográficas en el Golfo de México descritas en la Fig. 5.



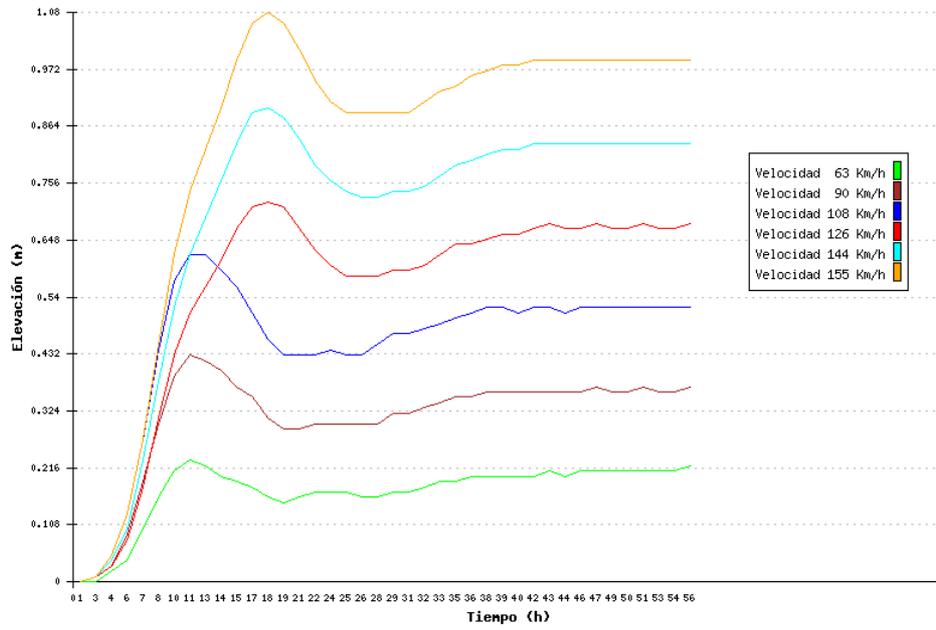
Cota de Inundación
Viento Proveniente del Este Noreste
Lon: -90.4 Lat: 20.92



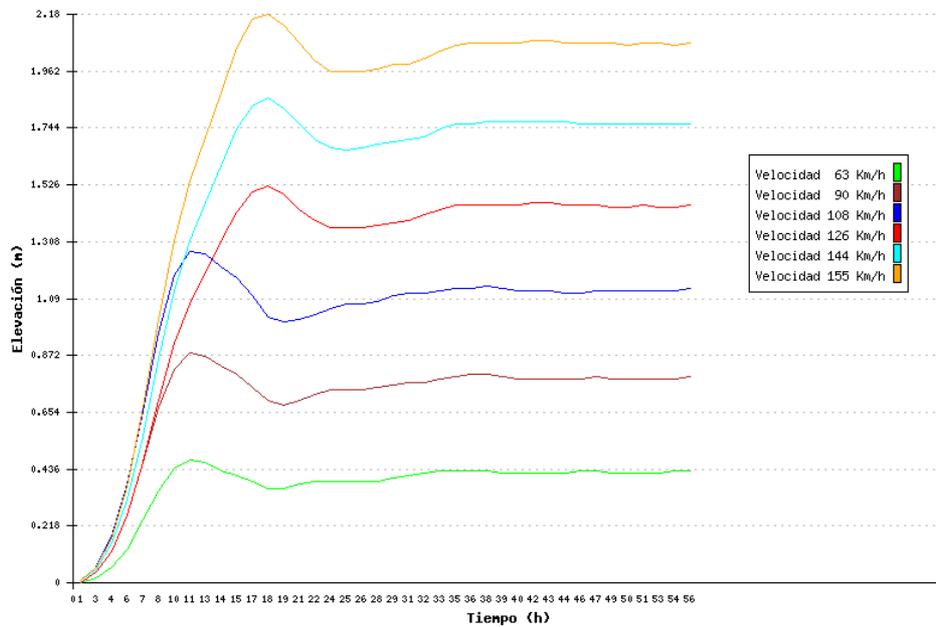
Cota de Inundación
Viento proveniente del Noreste
Lon: -90.4 Lat: 20.92

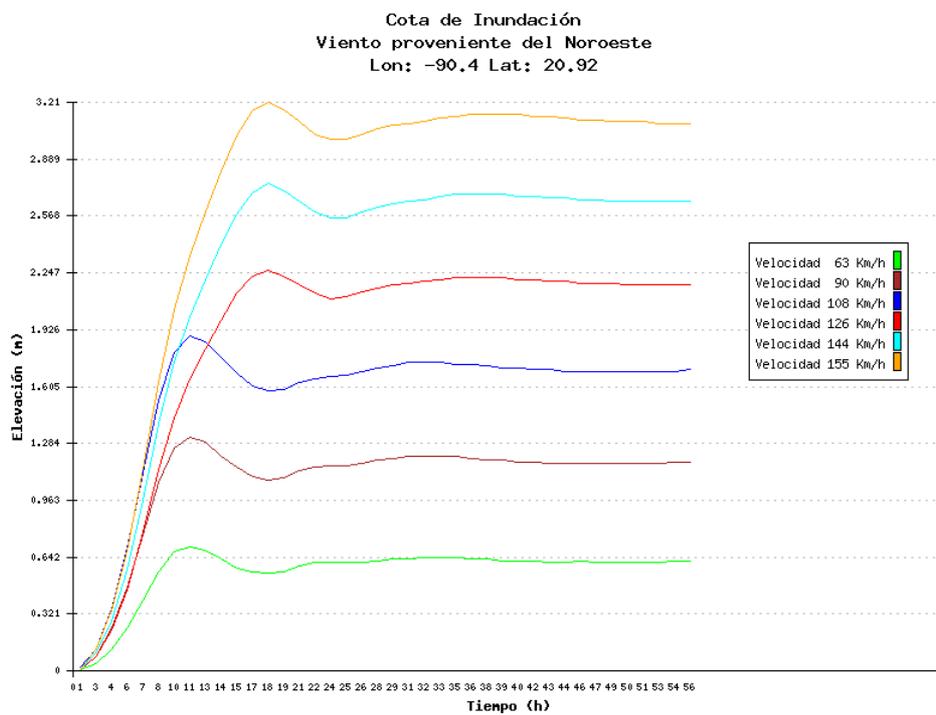
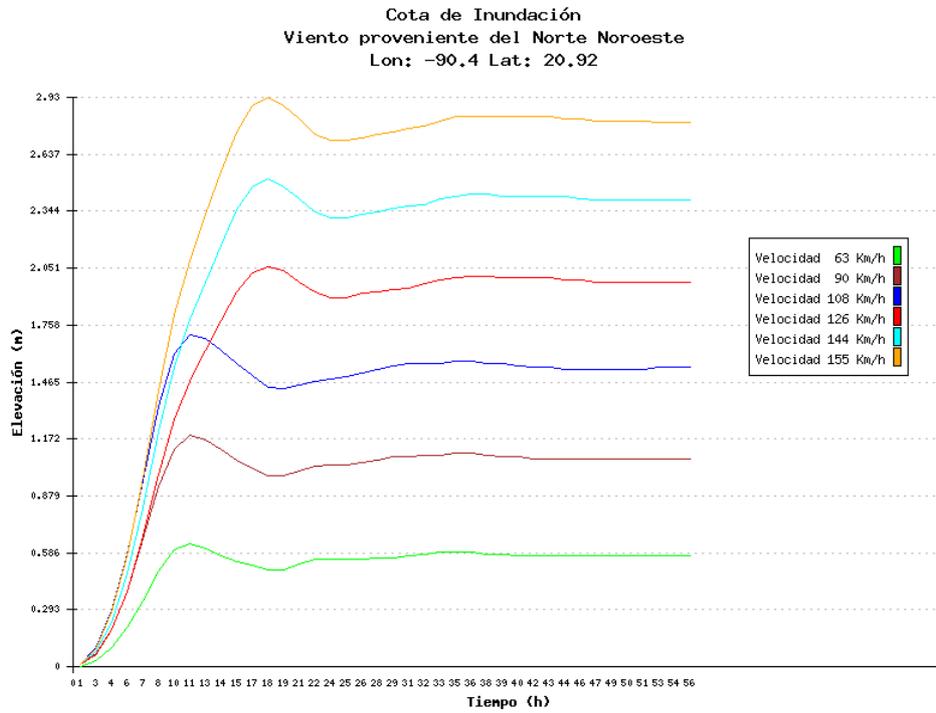


Cota de Inundación
 Viento proveniente del Norte Noreste
 Lon: -90.4 Lat: 20.92



Cota de Inundación
 Viento proveniente del Norte
 Lon: -90.4 Lat: 20.92





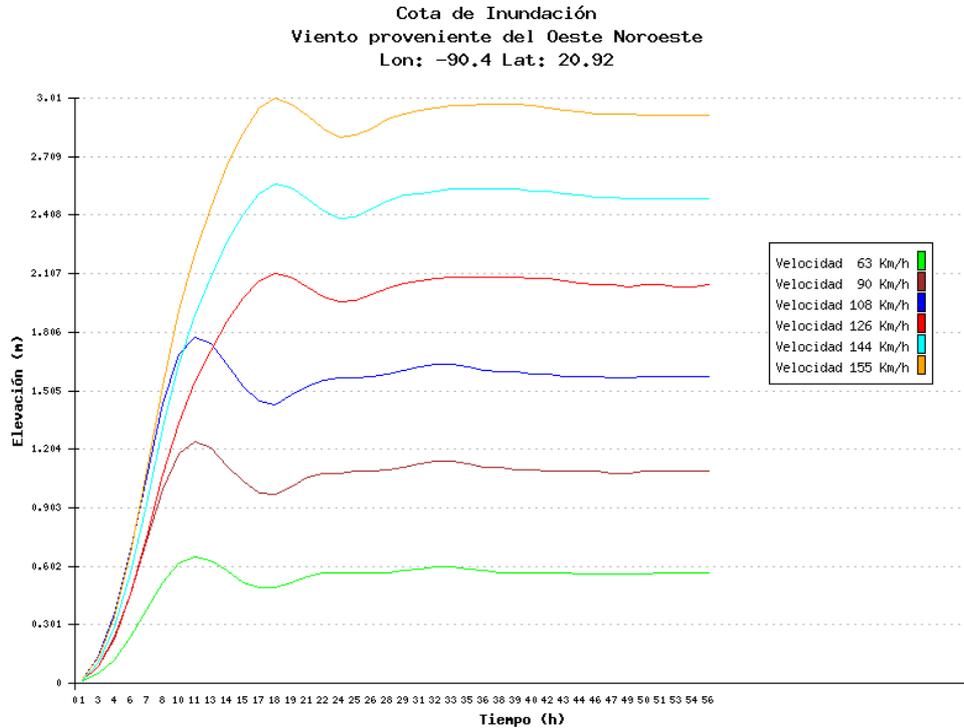
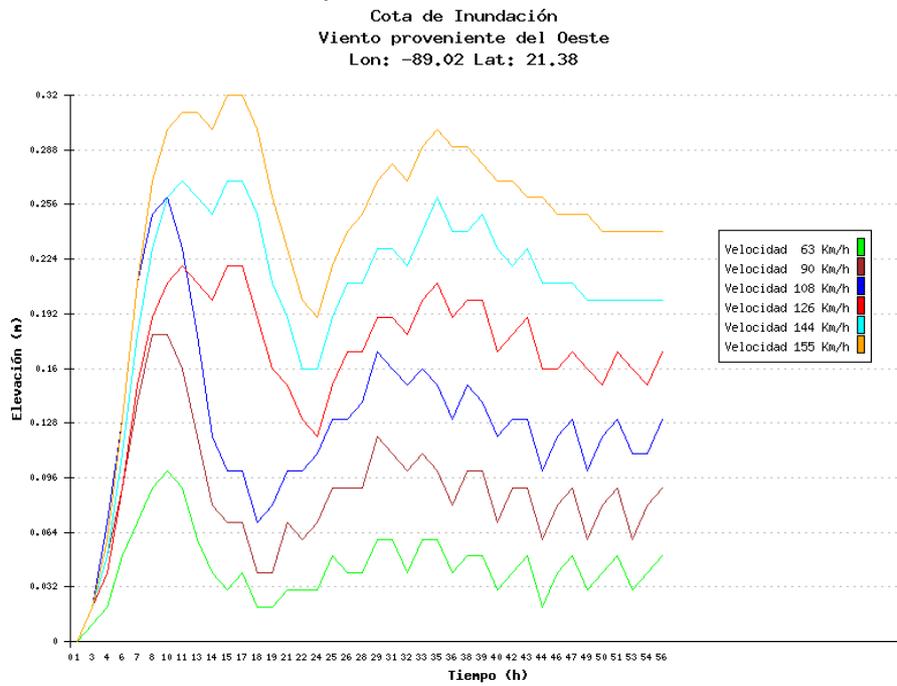
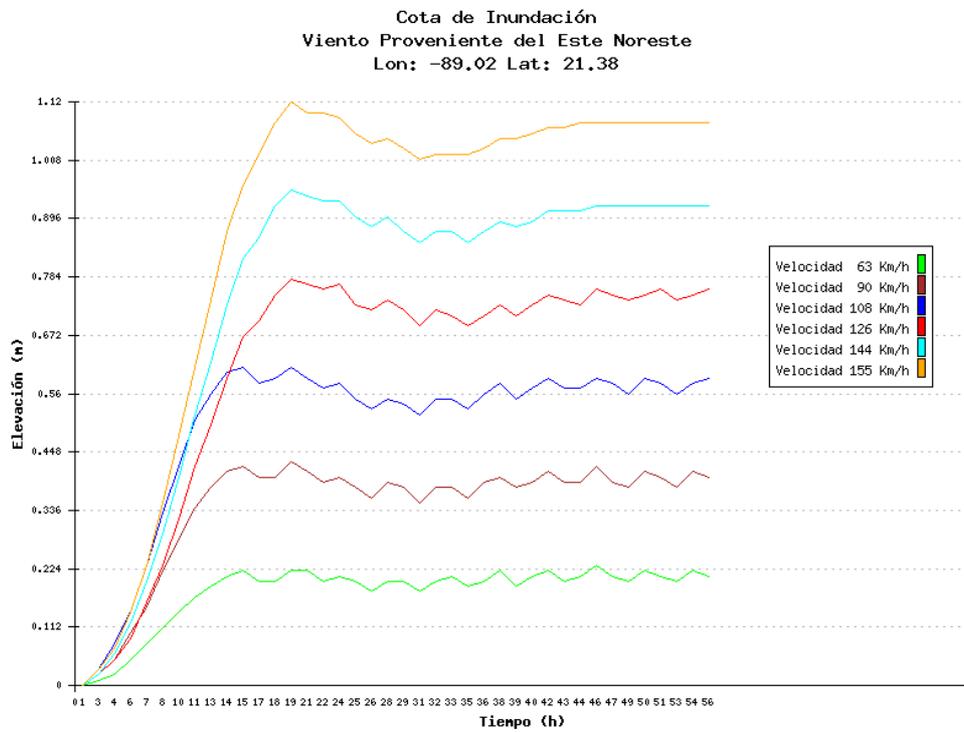
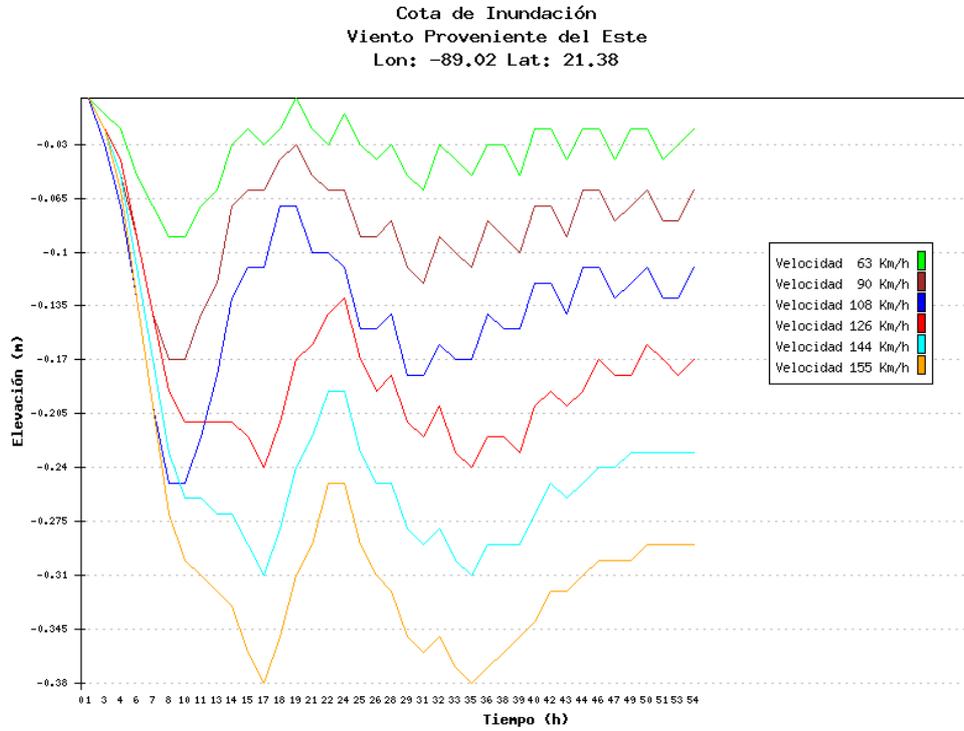
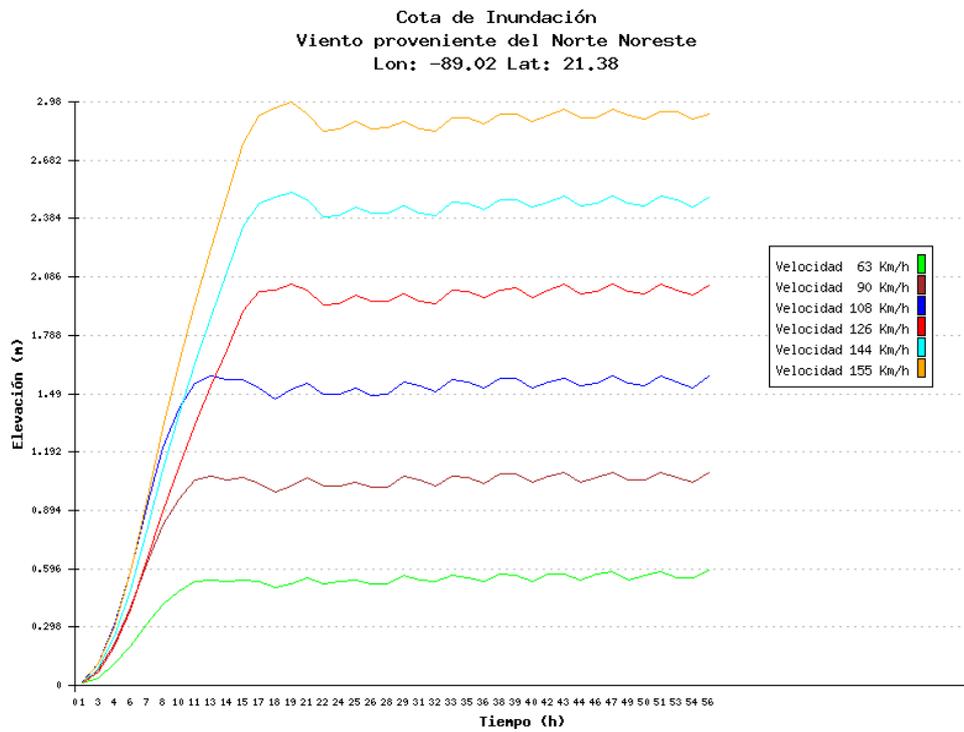
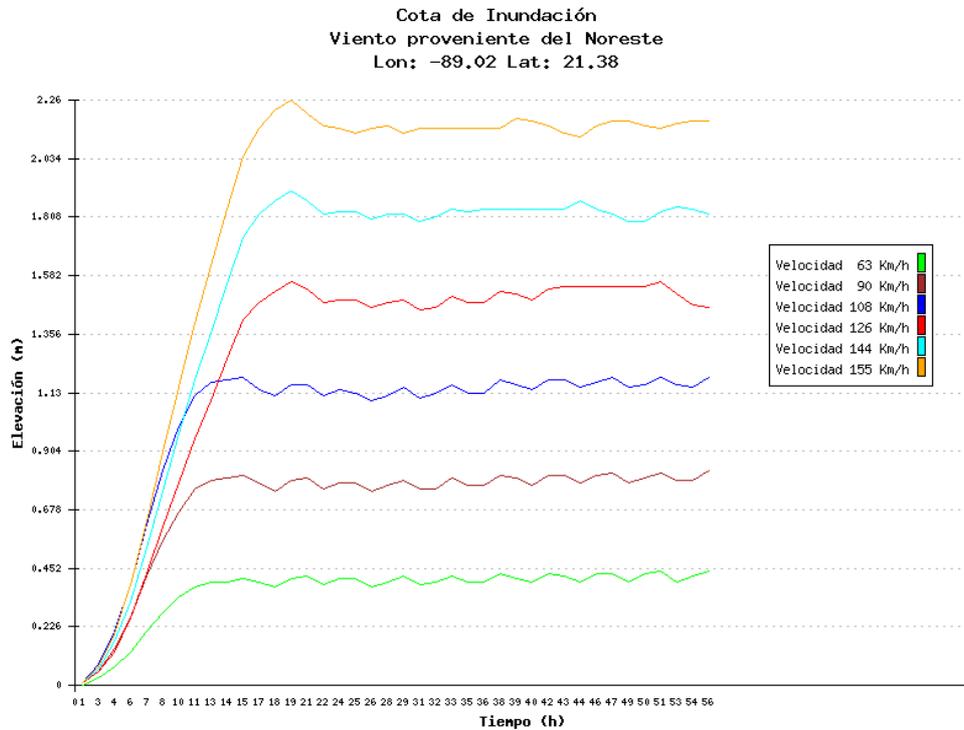
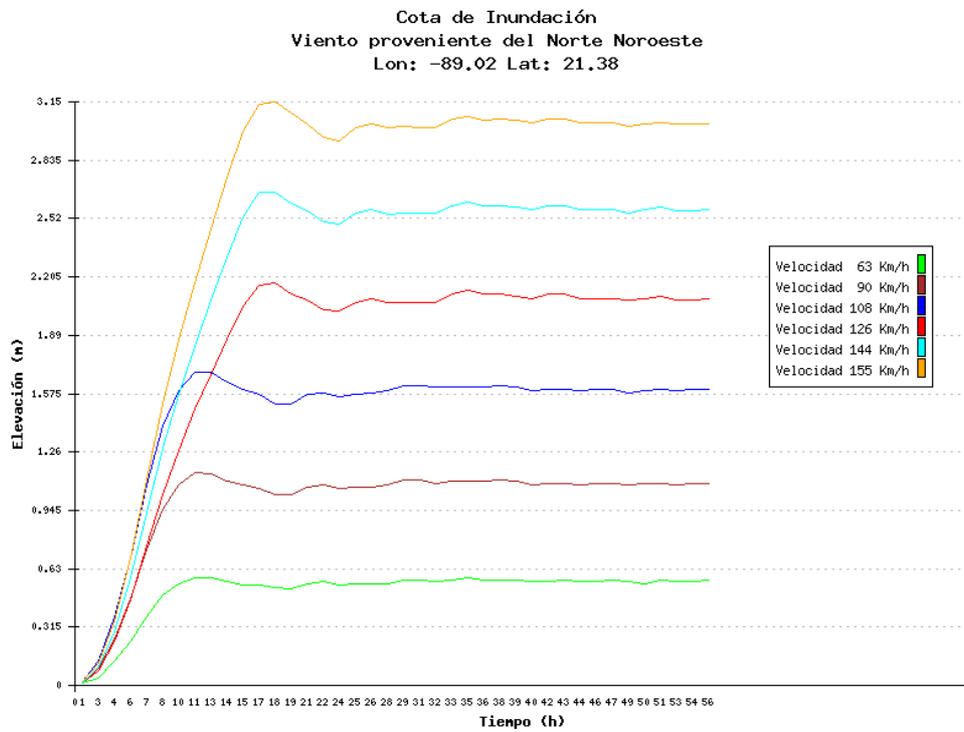
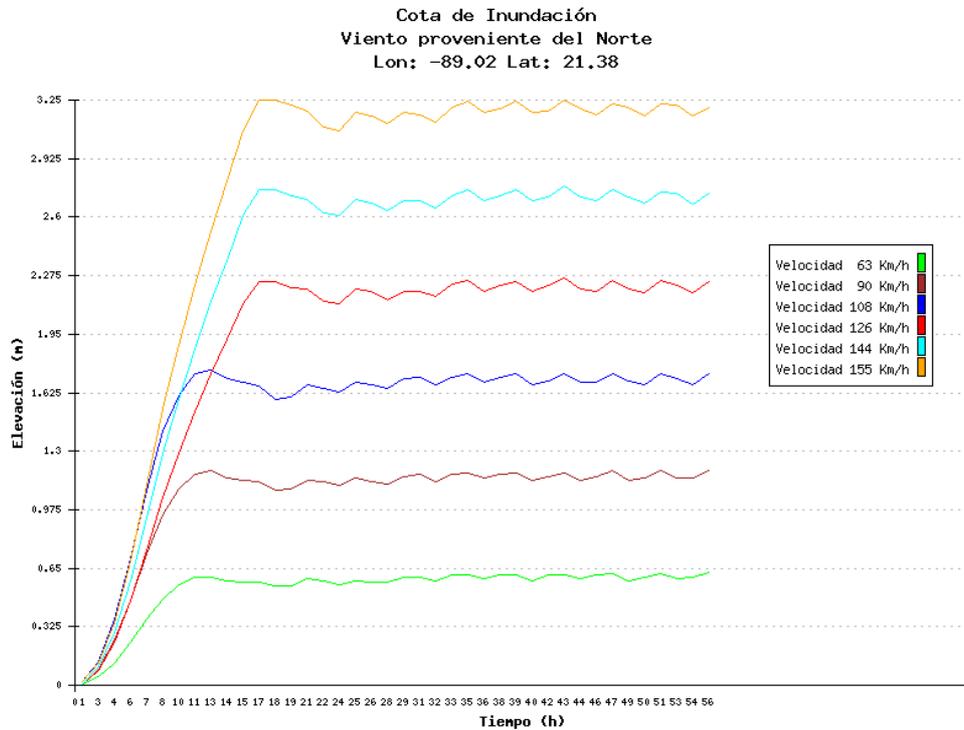


Figura 6. Ejemplo de gráficos en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -90.4 y 20.92. Estado Yucatan.









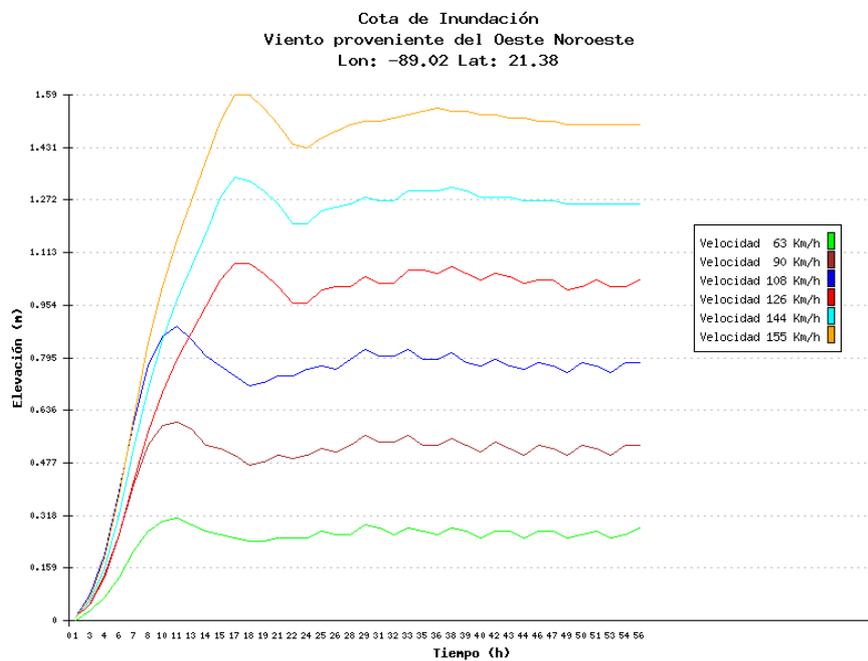
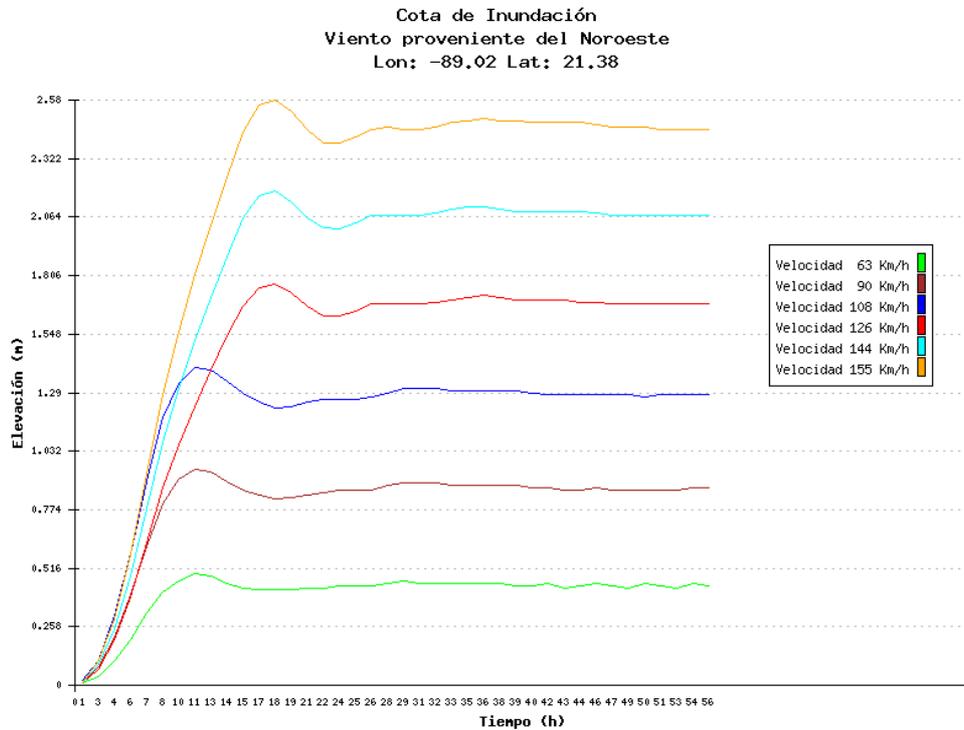
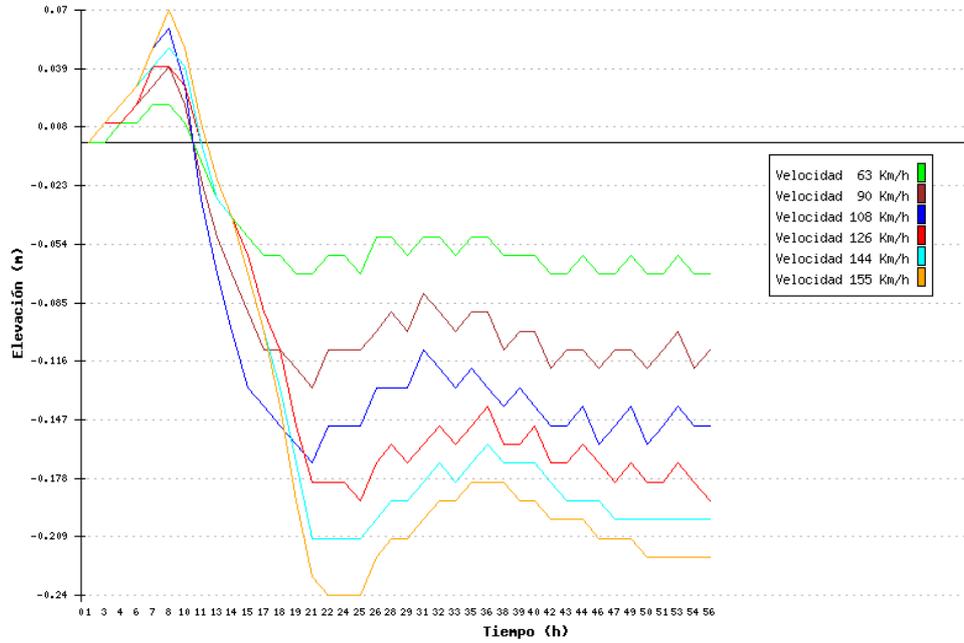
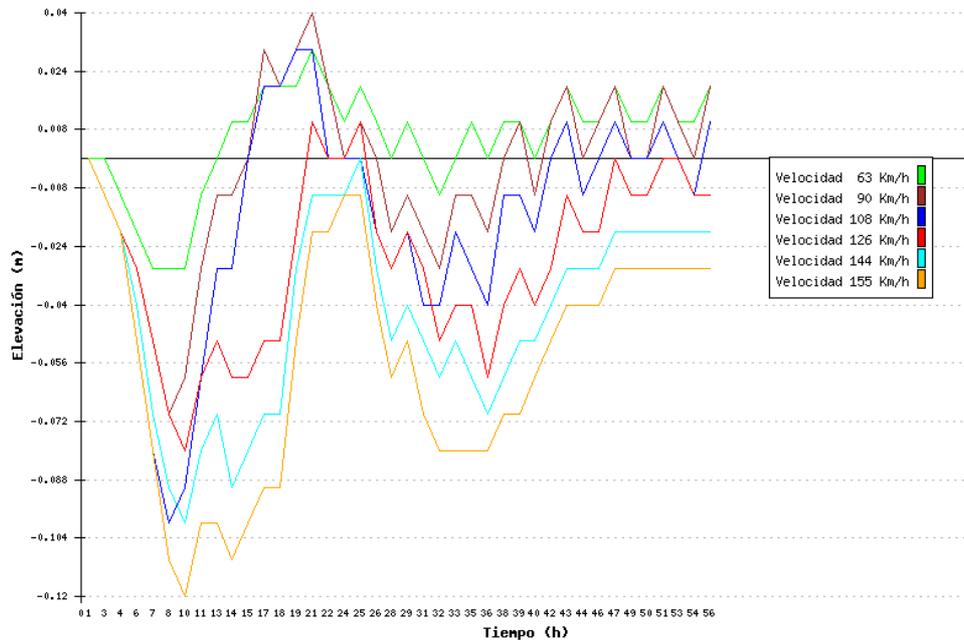


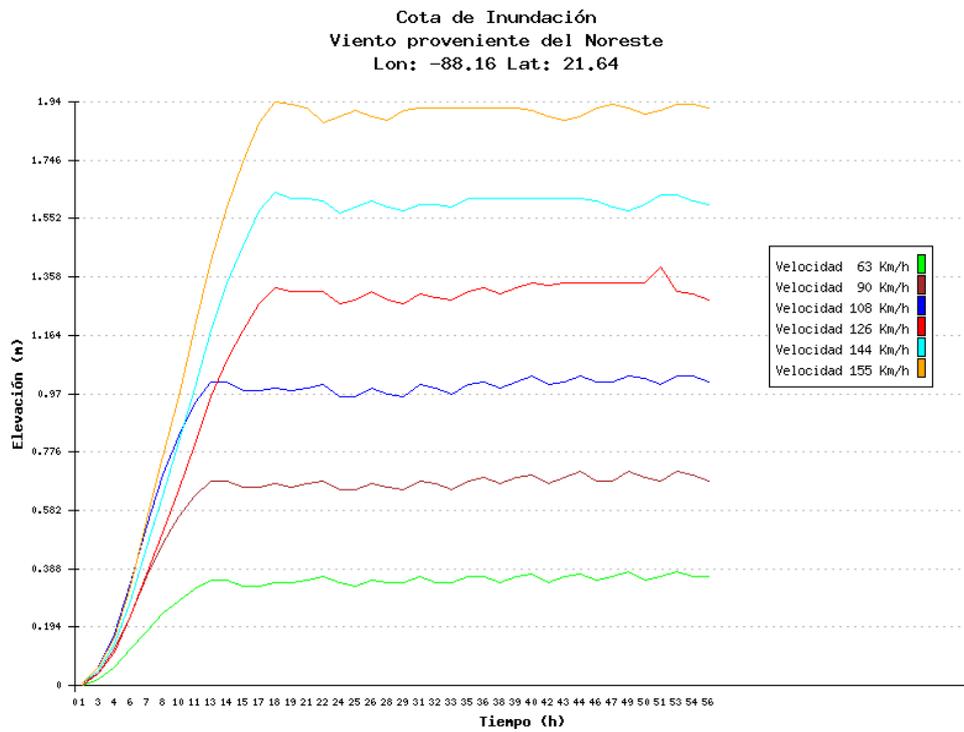
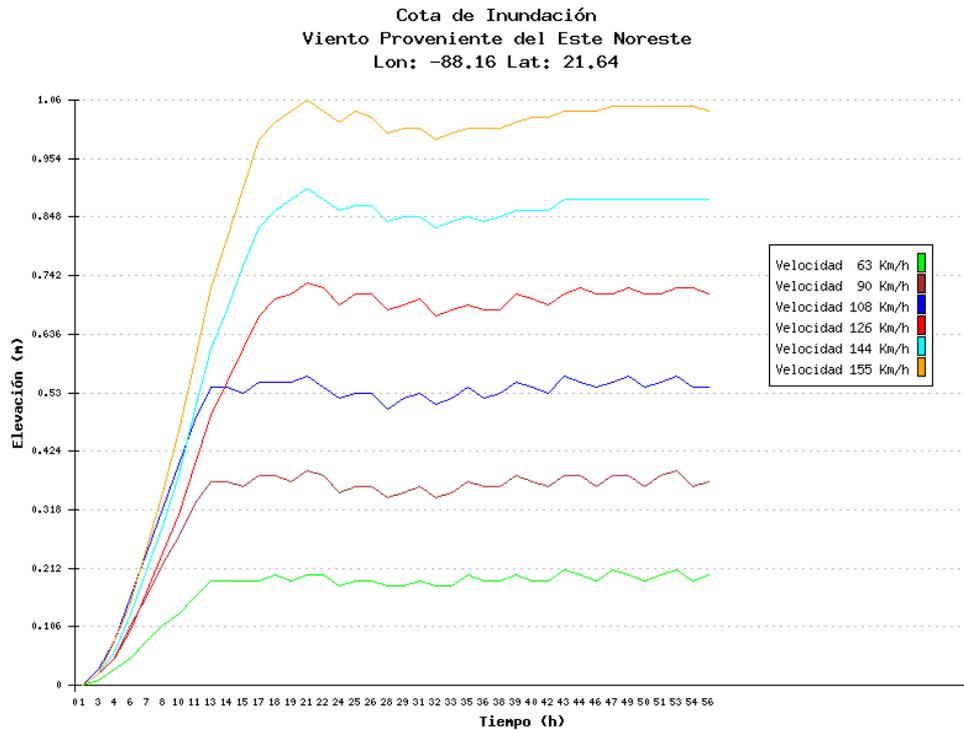
Figura 7. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -89.02 y 21.38. Estado Yucatán

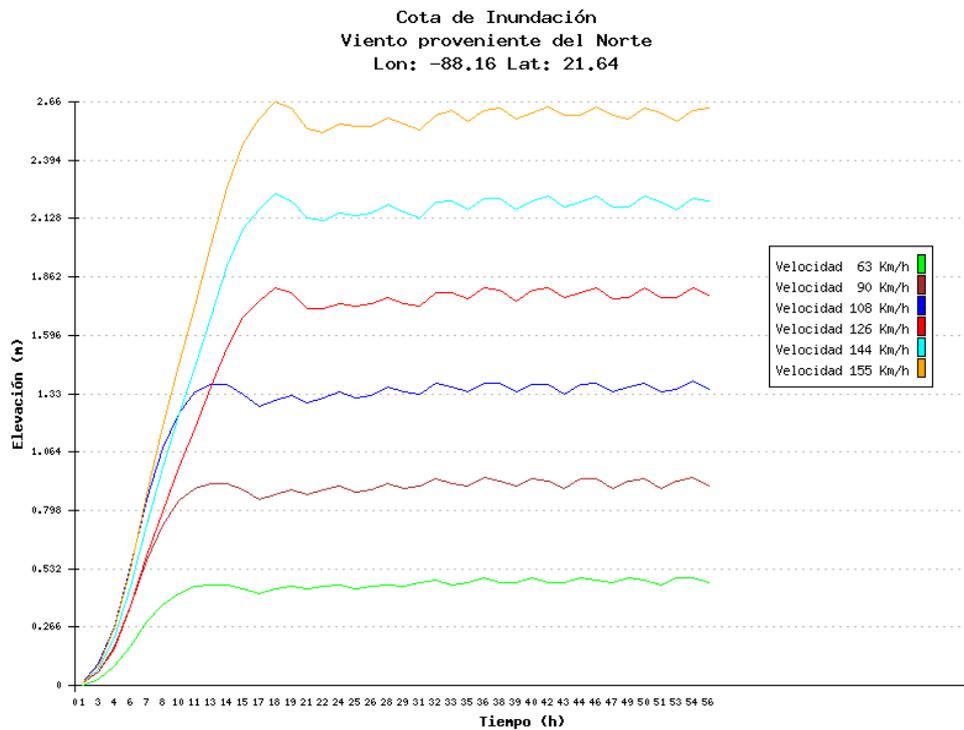
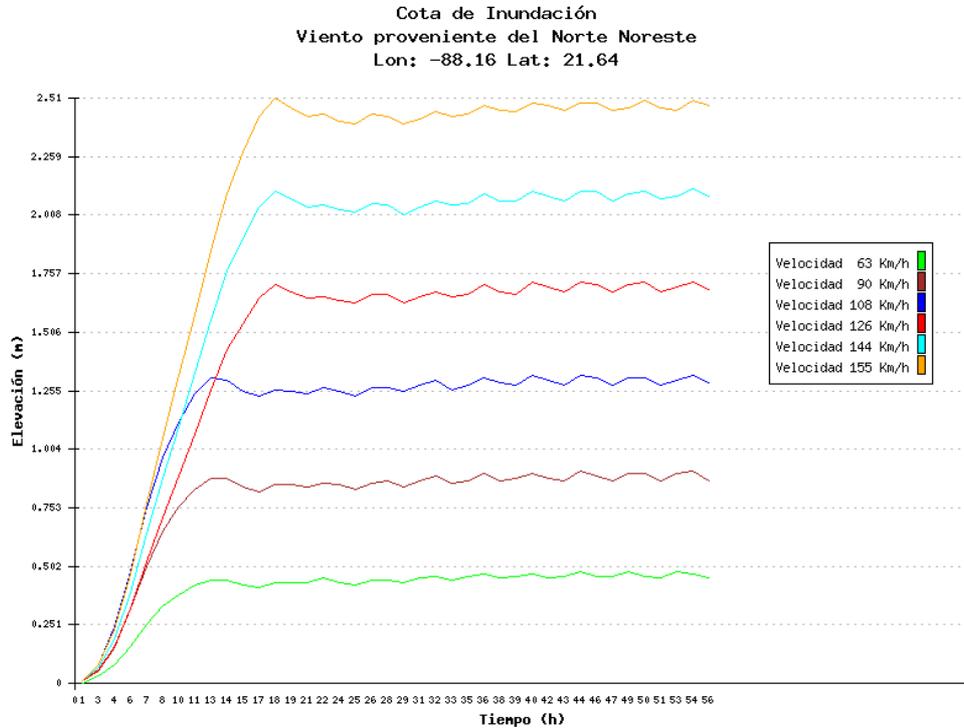
Cota de Inundación
Viento proveniente del Oeste
Lon: -88.16 Lat: 21.64

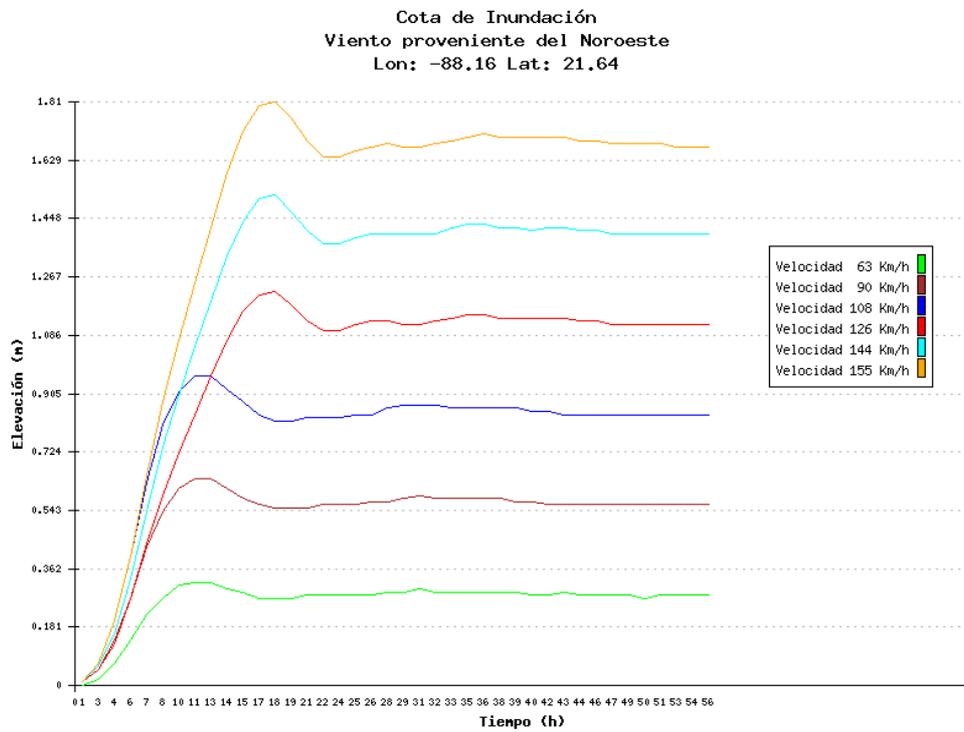
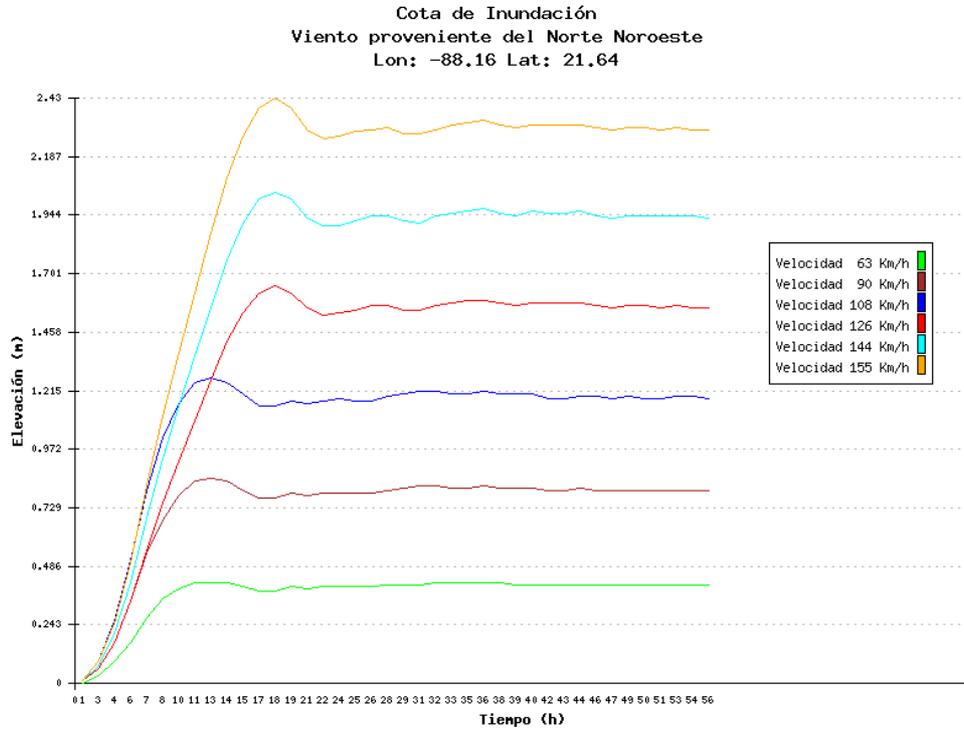


Cota de Inundación
Viento Proveniente del Este
Lon: -88.16 Lat: 21.64









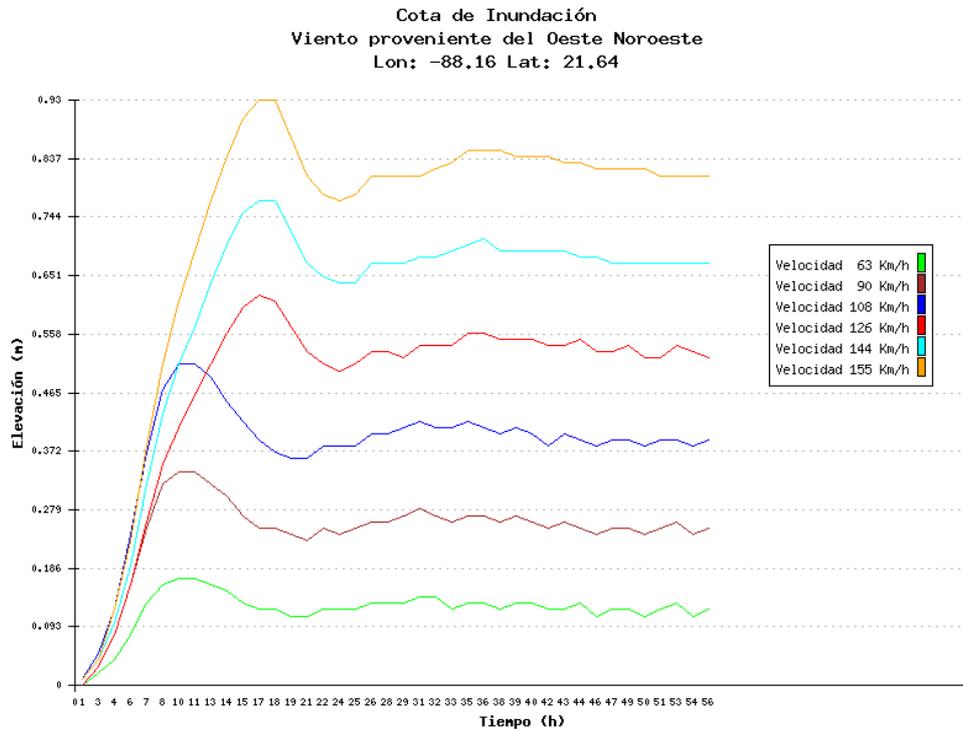
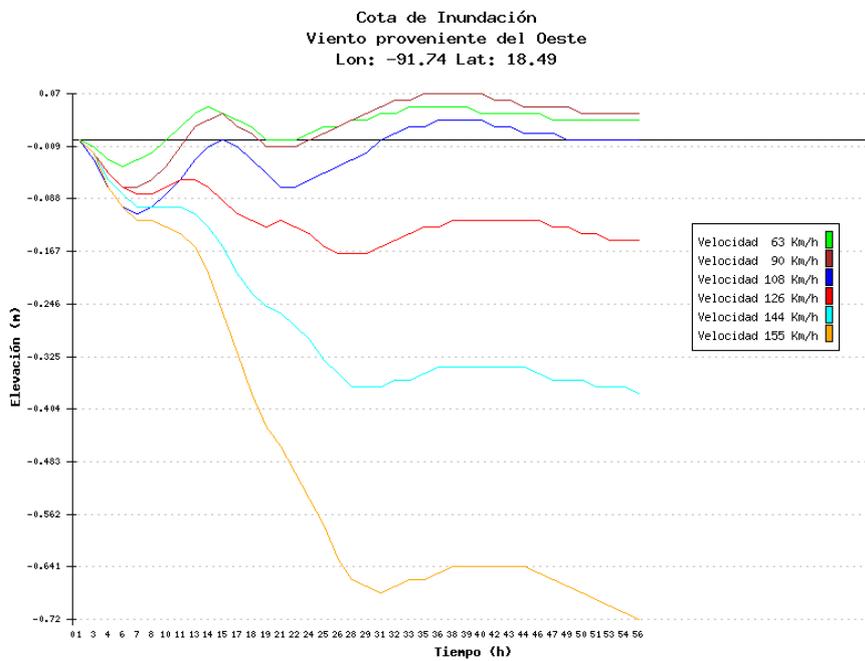
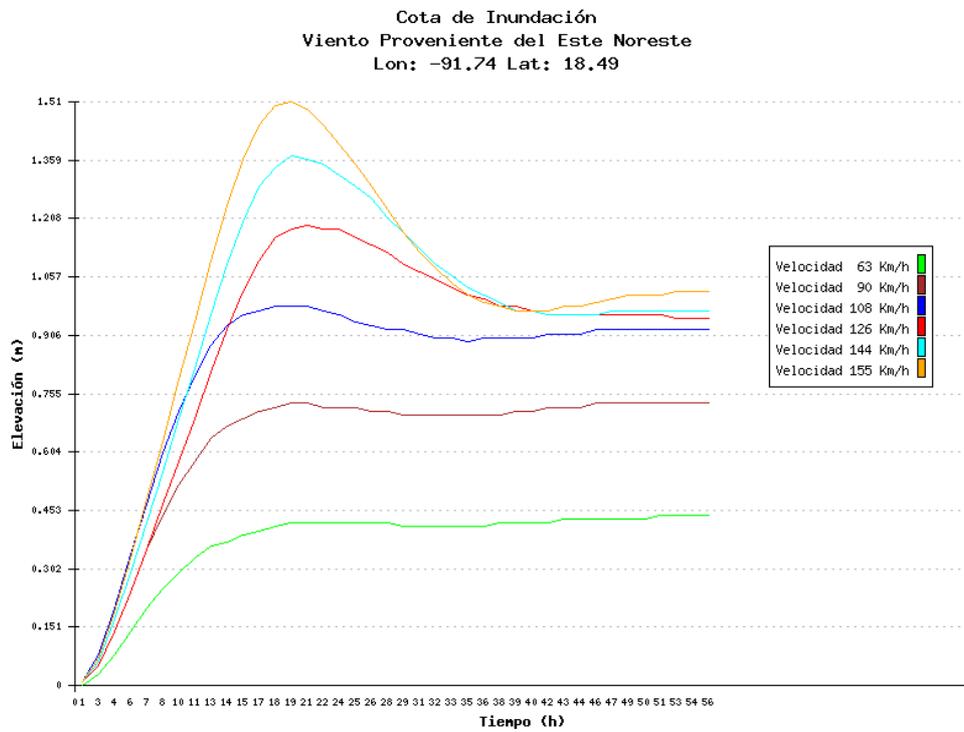
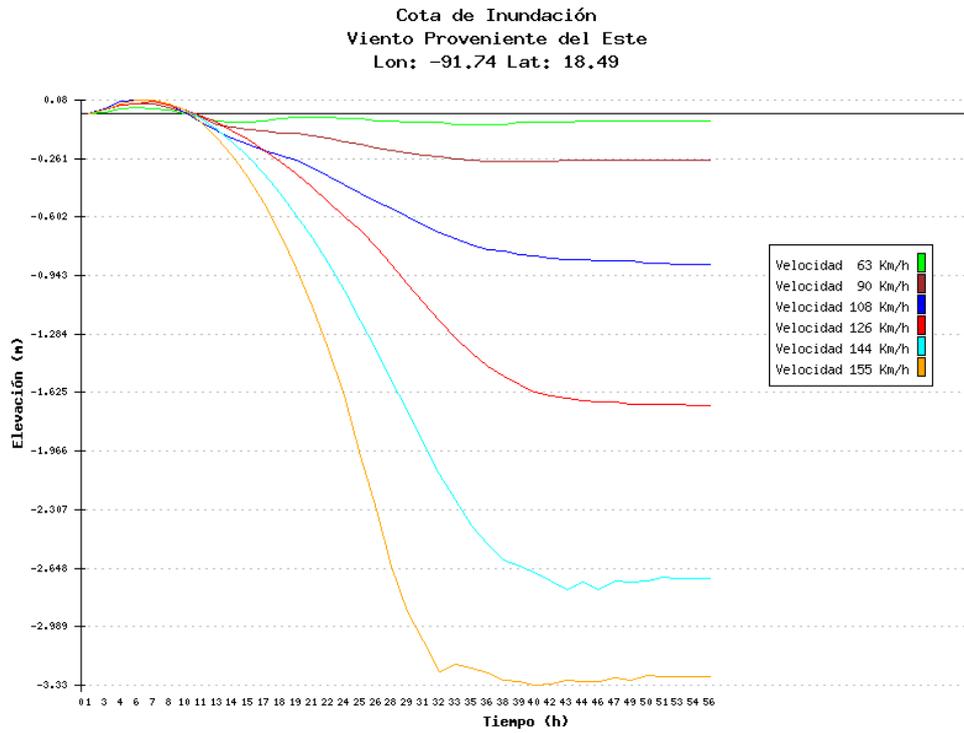
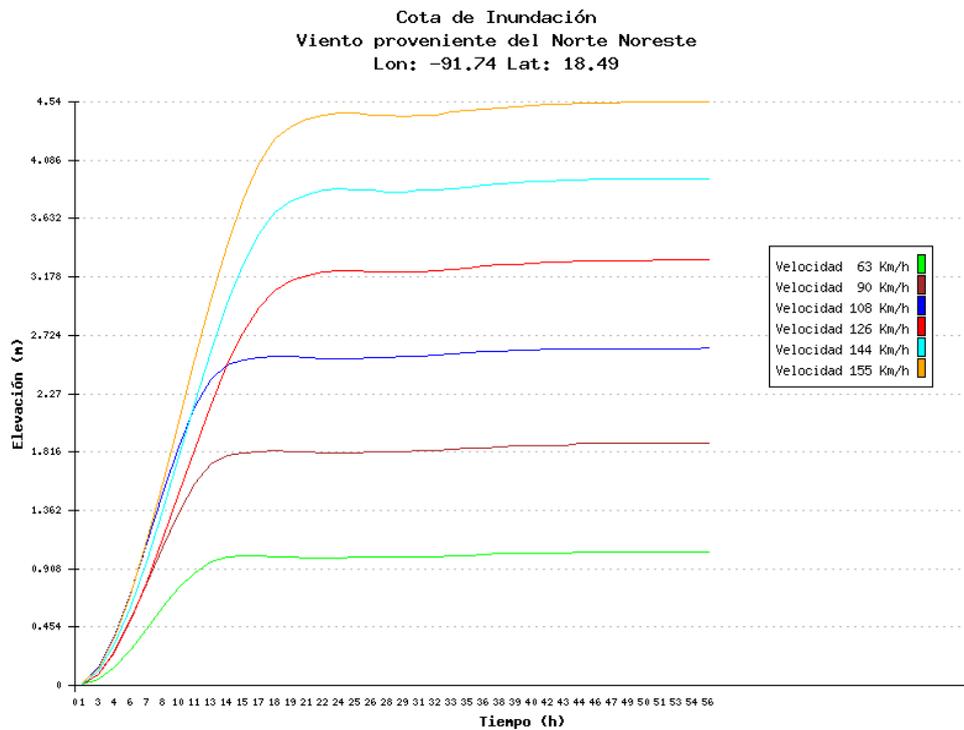
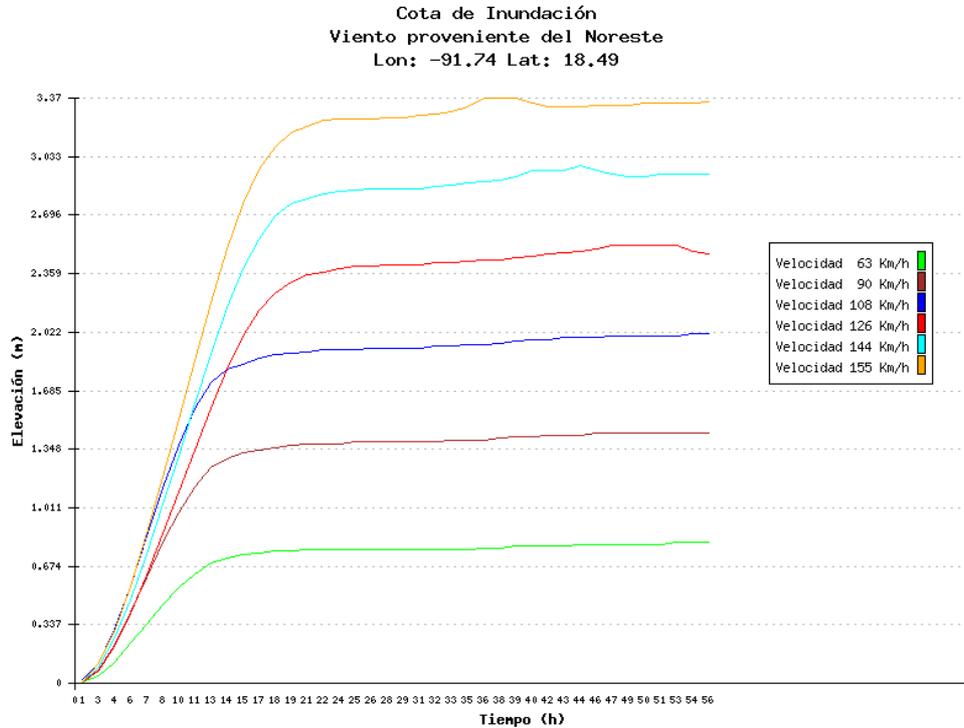
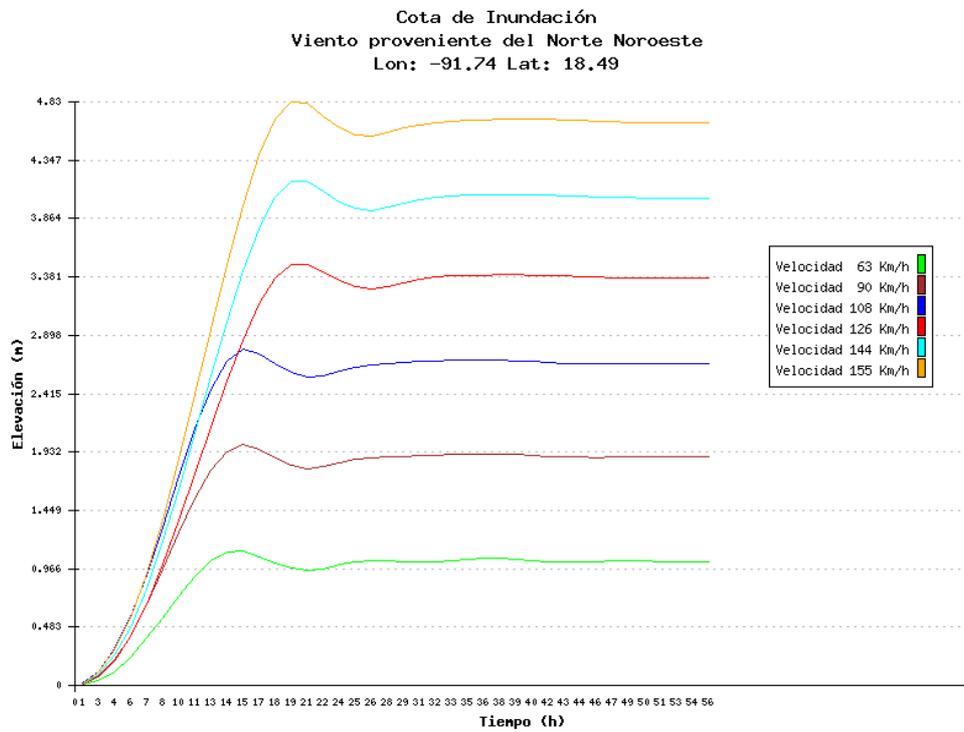
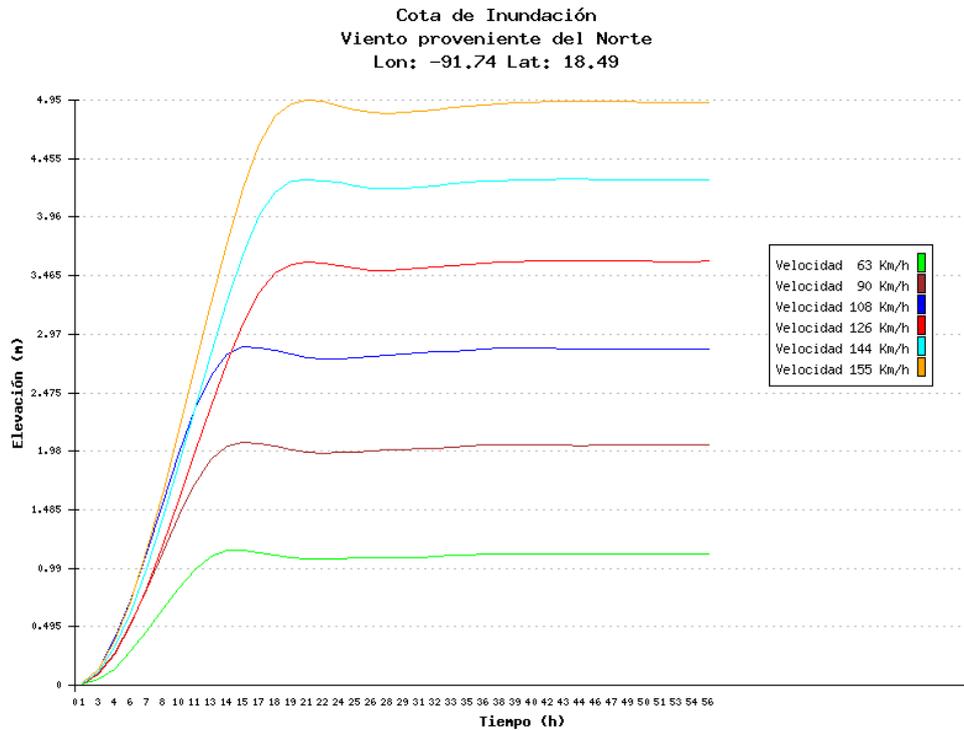


Figura 8. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -89.02 y 21.38. Estado Yucatán









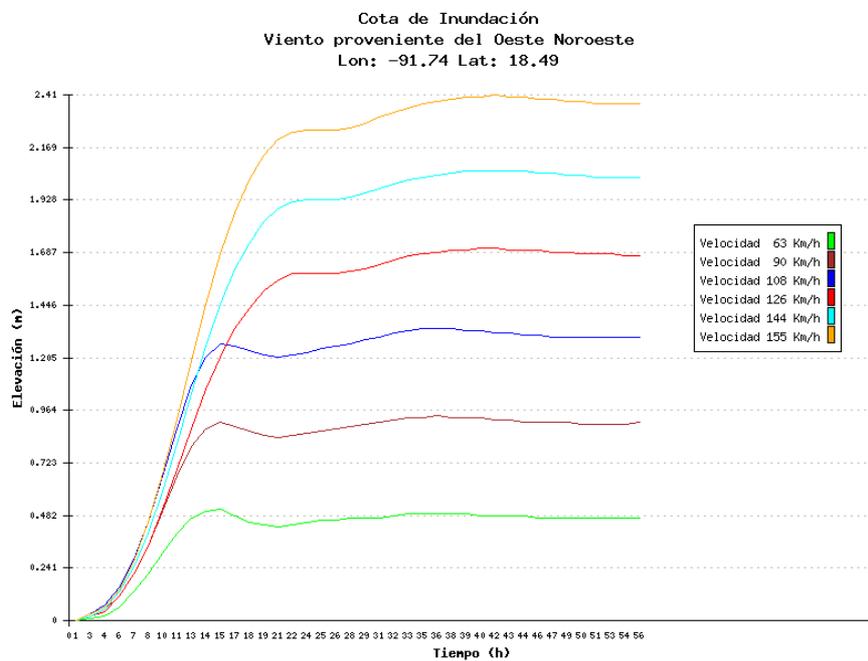
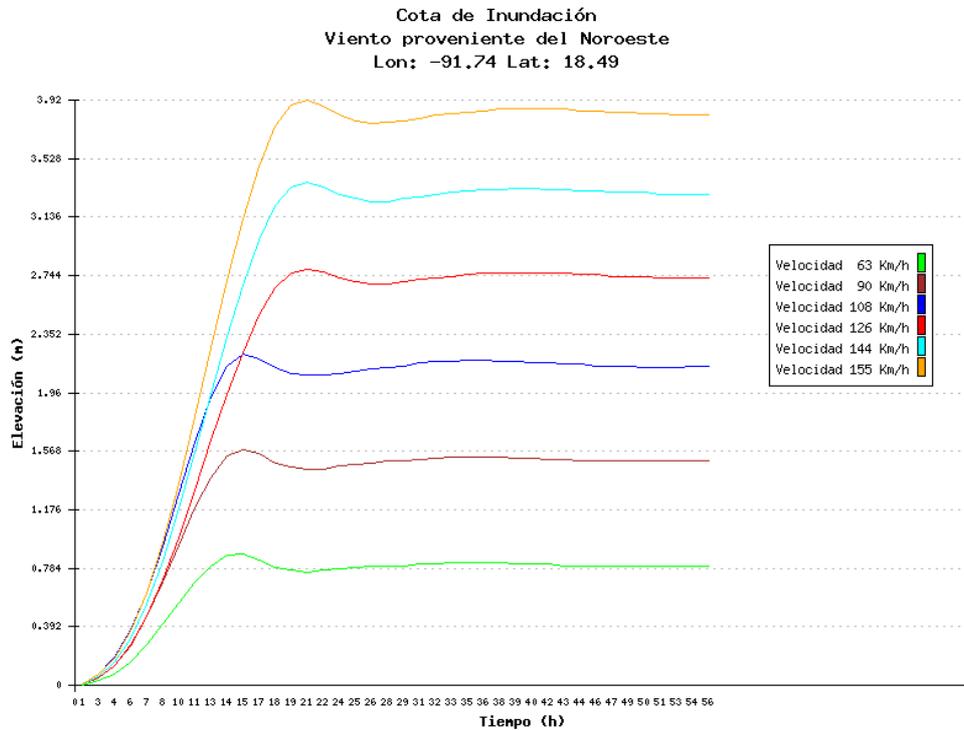
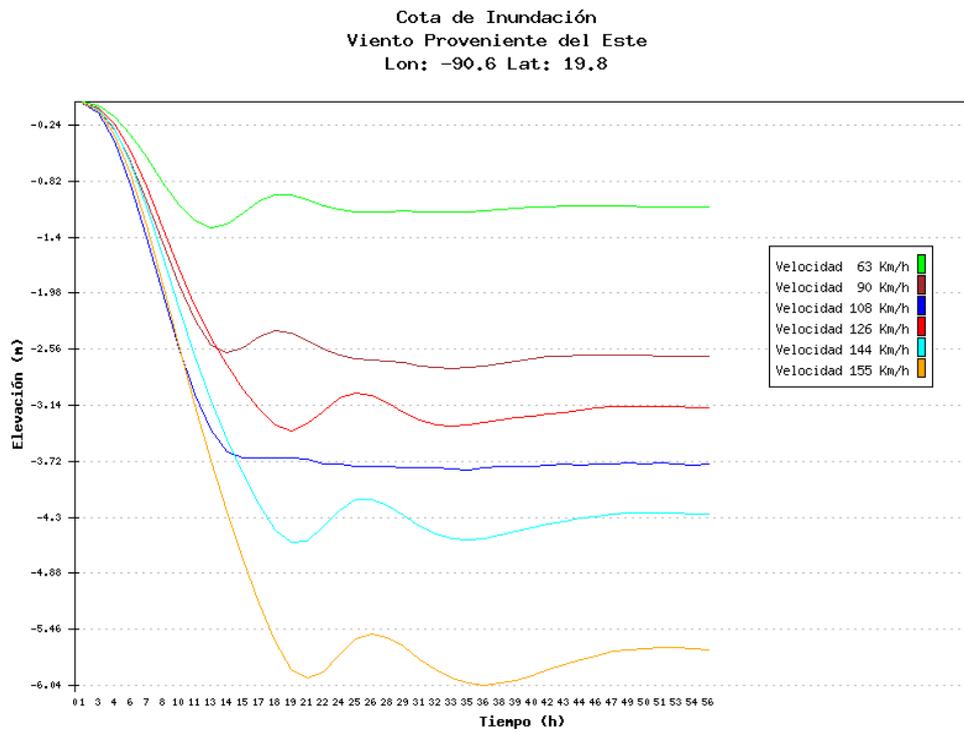
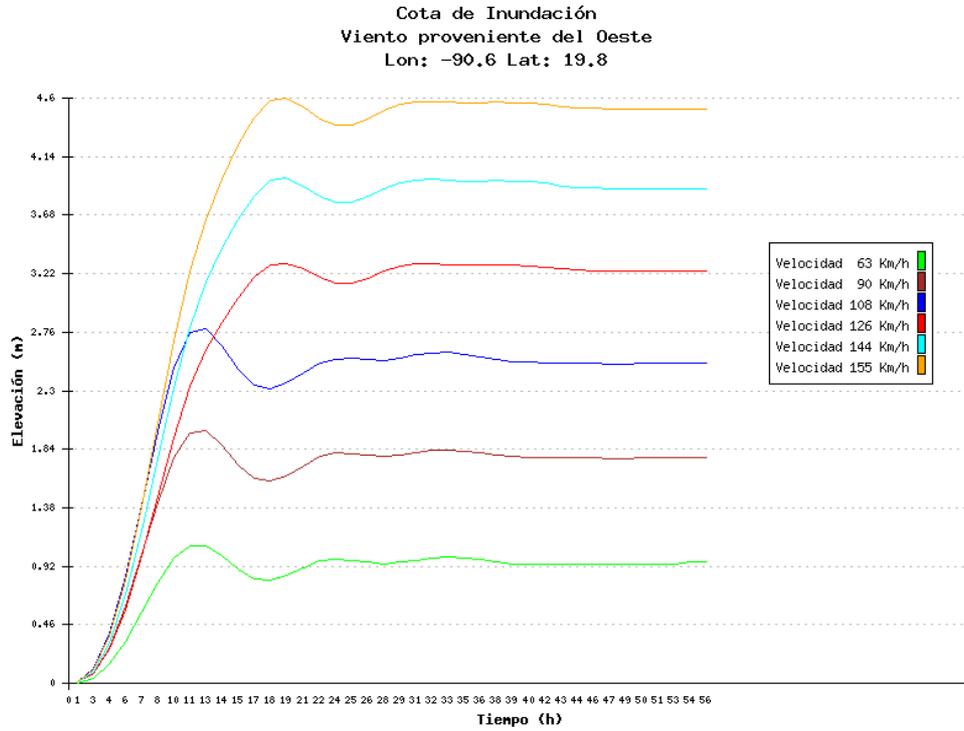
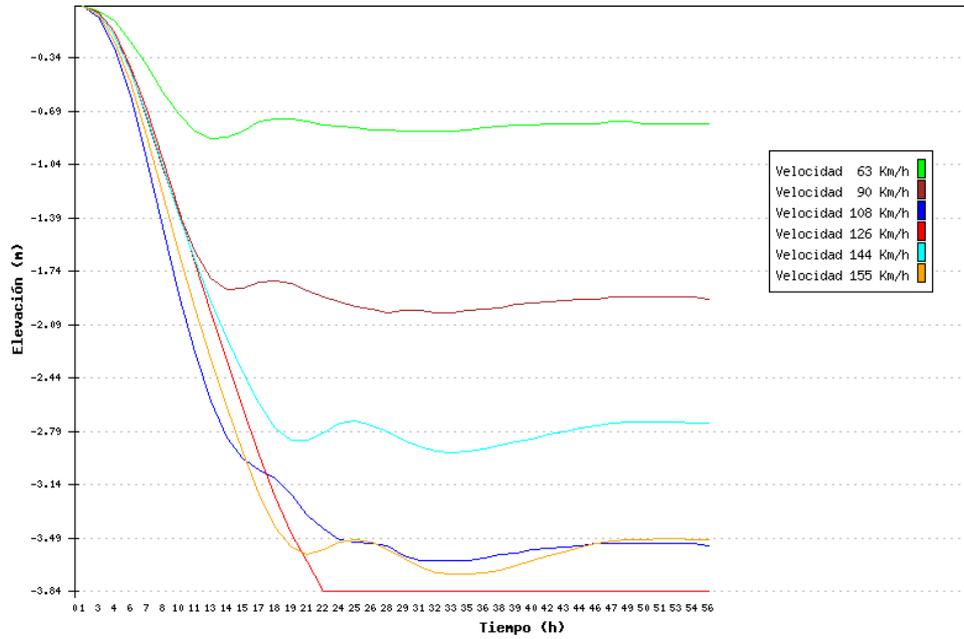


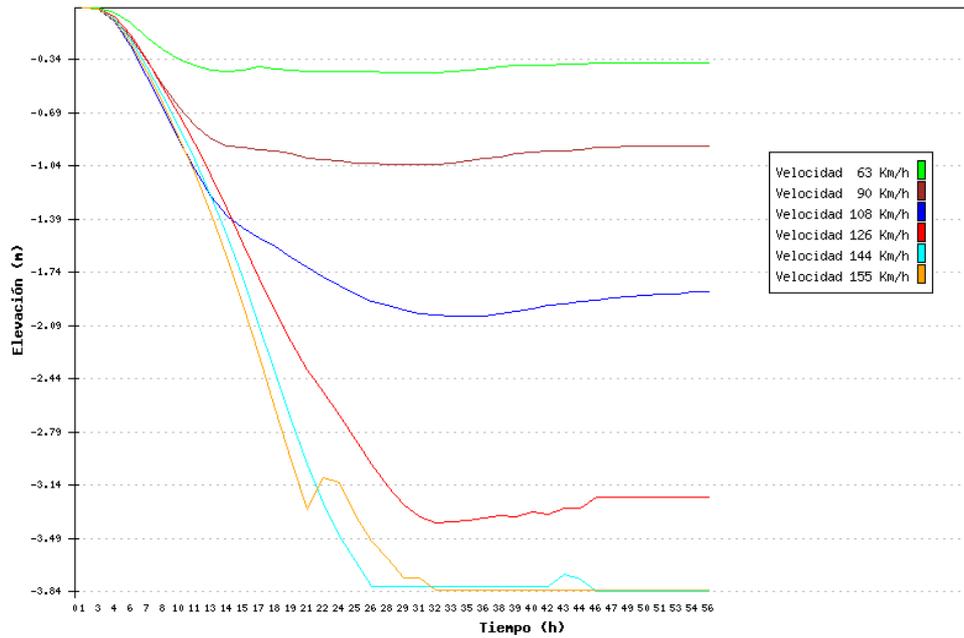
Figura 9. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -91.74 y 18.49. Estado Campeche

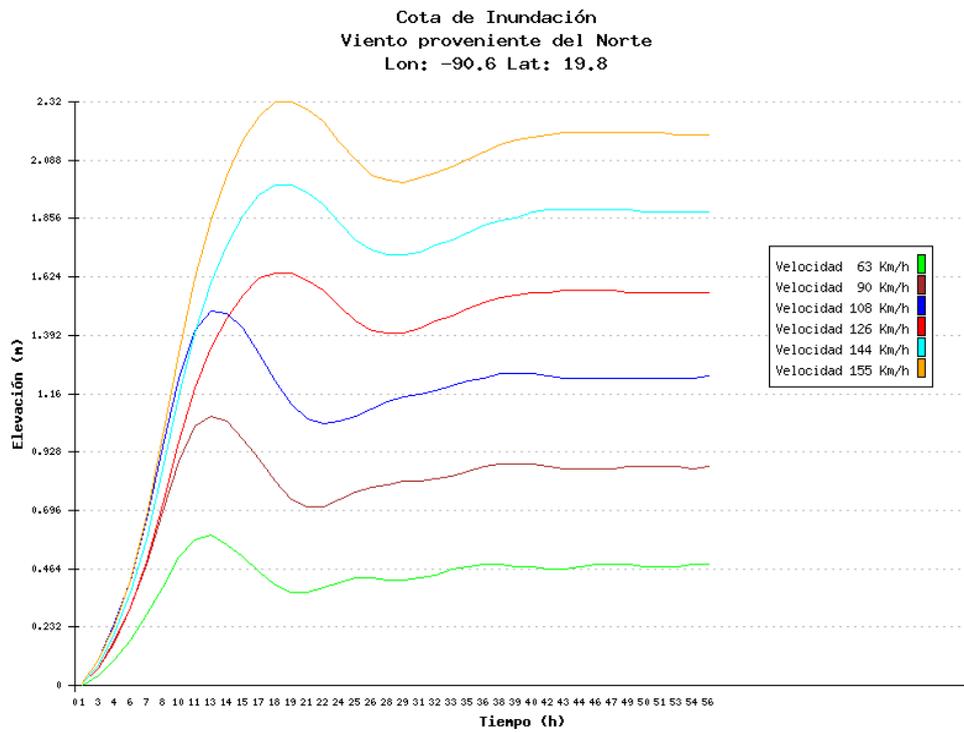
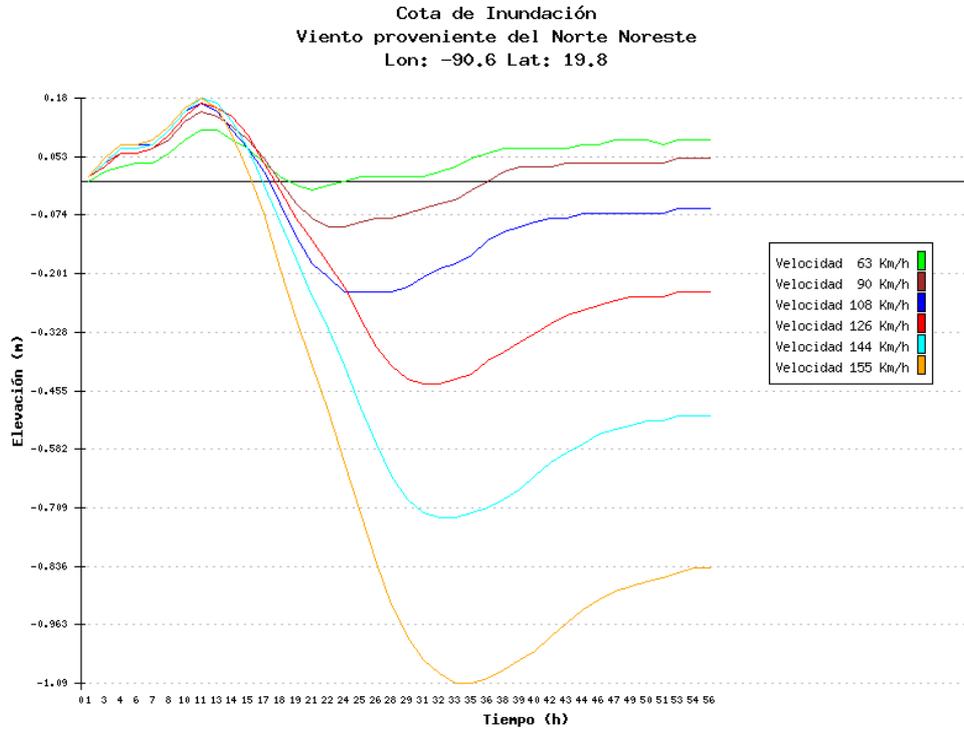


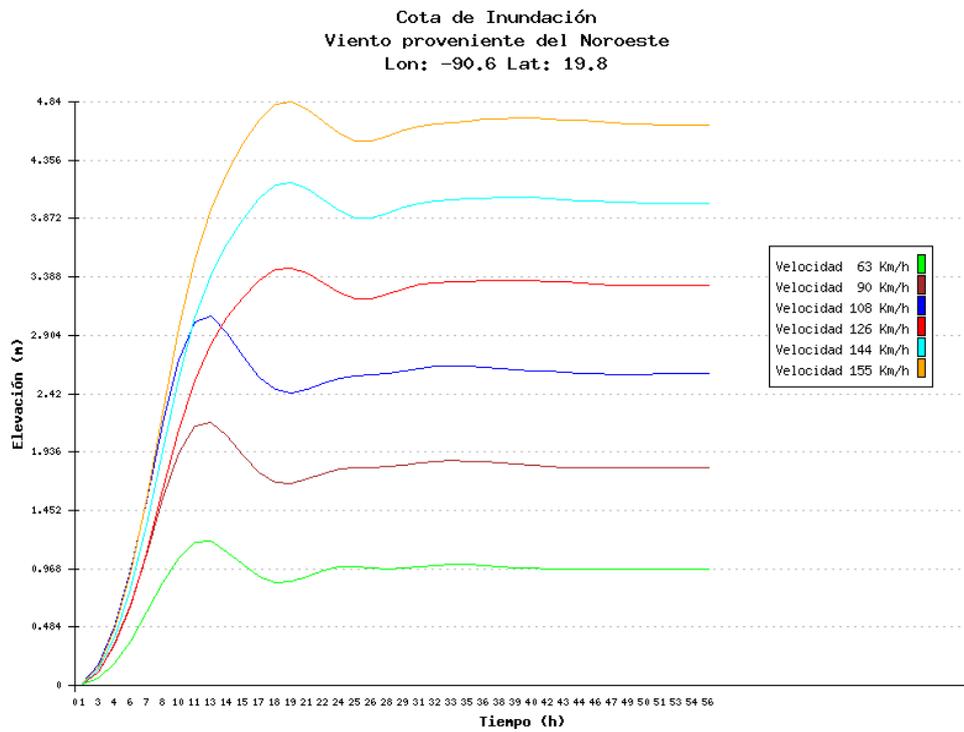
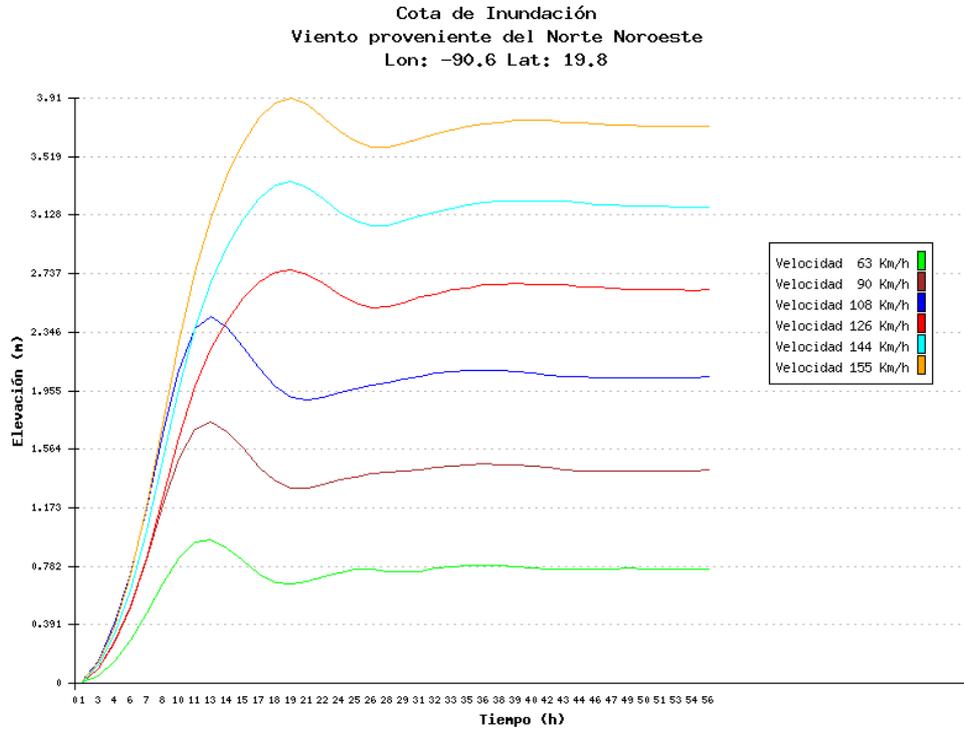
Cota de Inundación
Viento Proveniente del Este Noreste
Lon: -90.6 Lat: 19.8



Cota de Inundación
Viento proveniente del Noreste
Lon: -90.6 Lat: 19.8







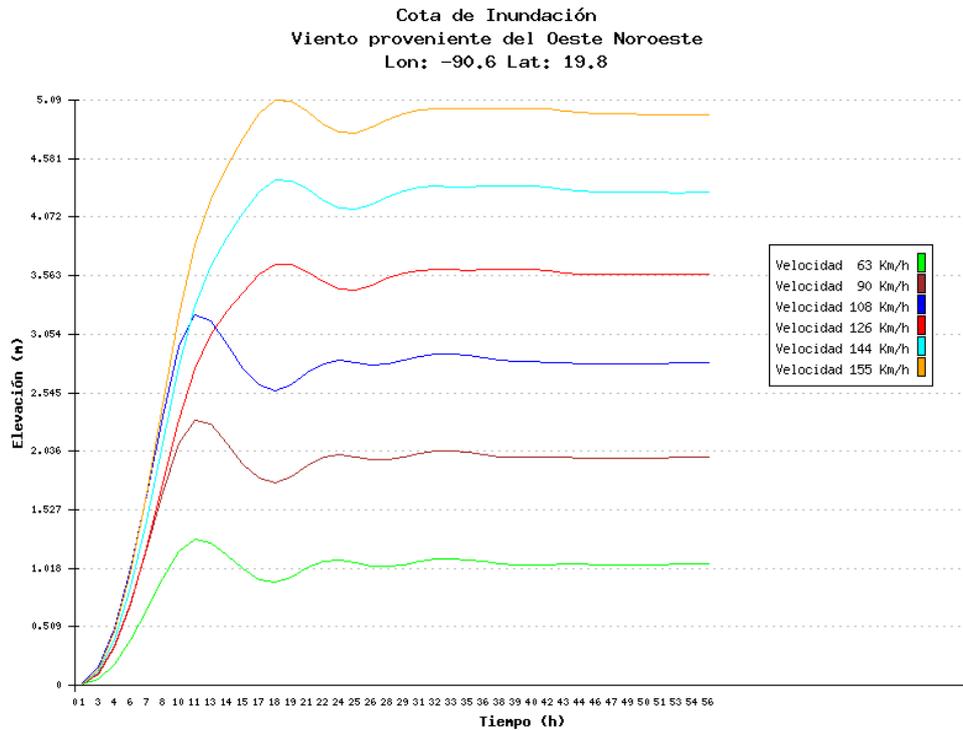
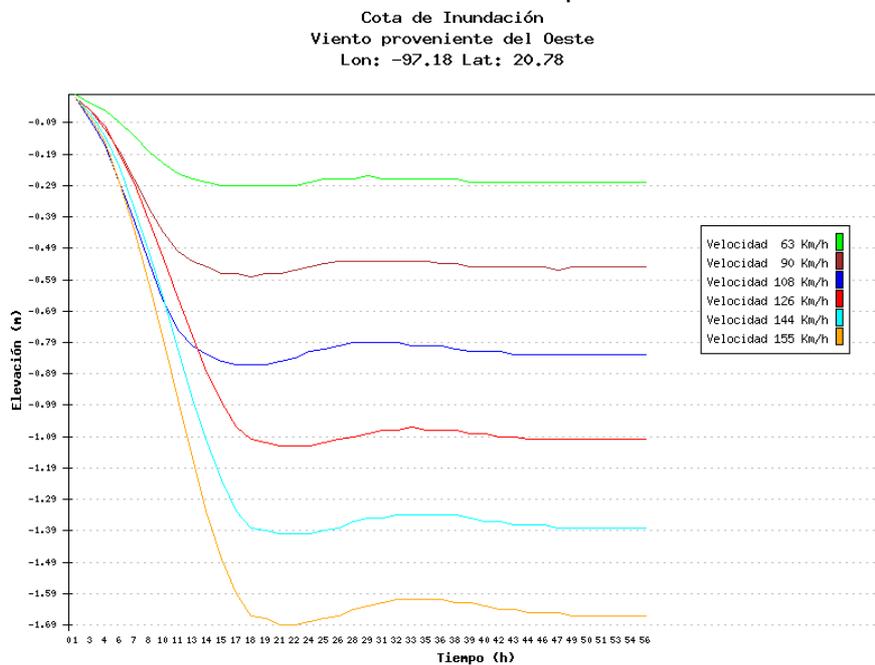
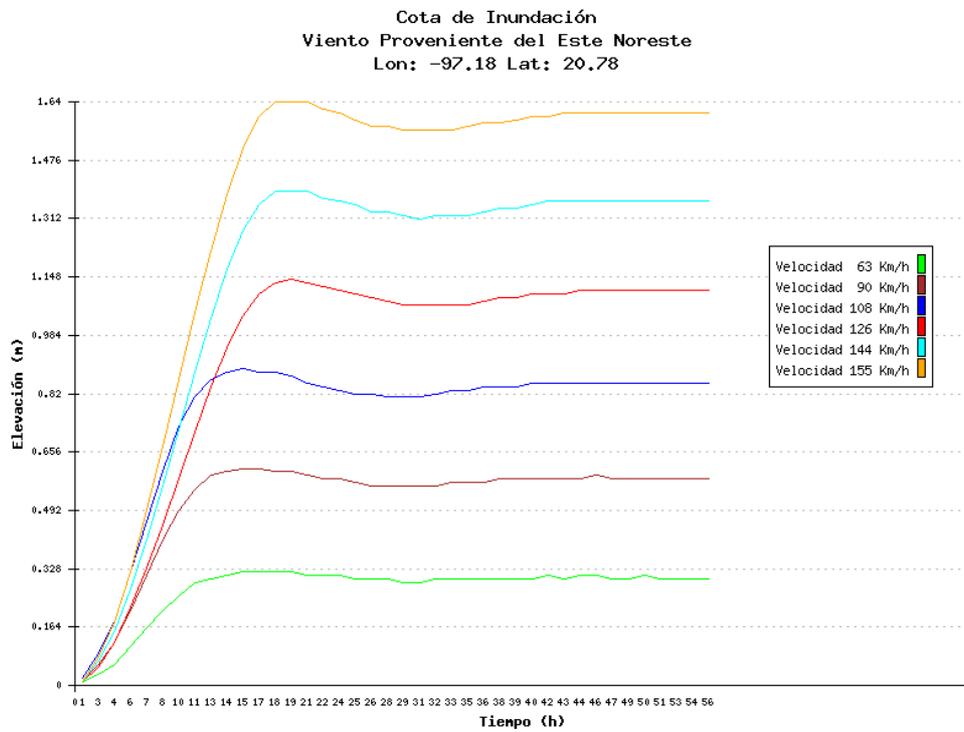
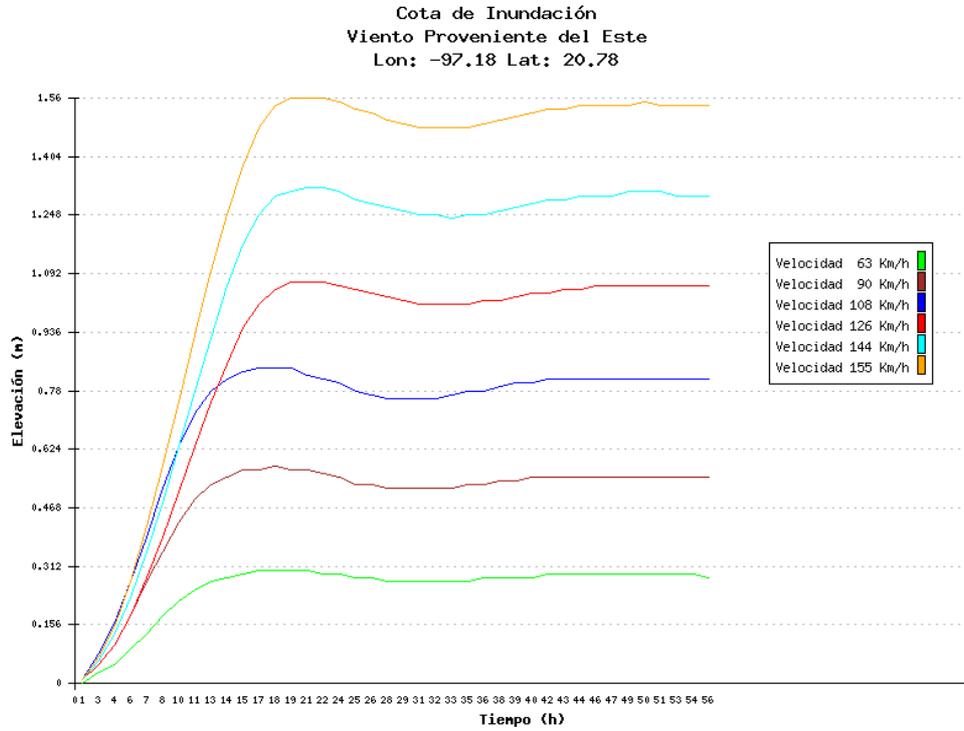
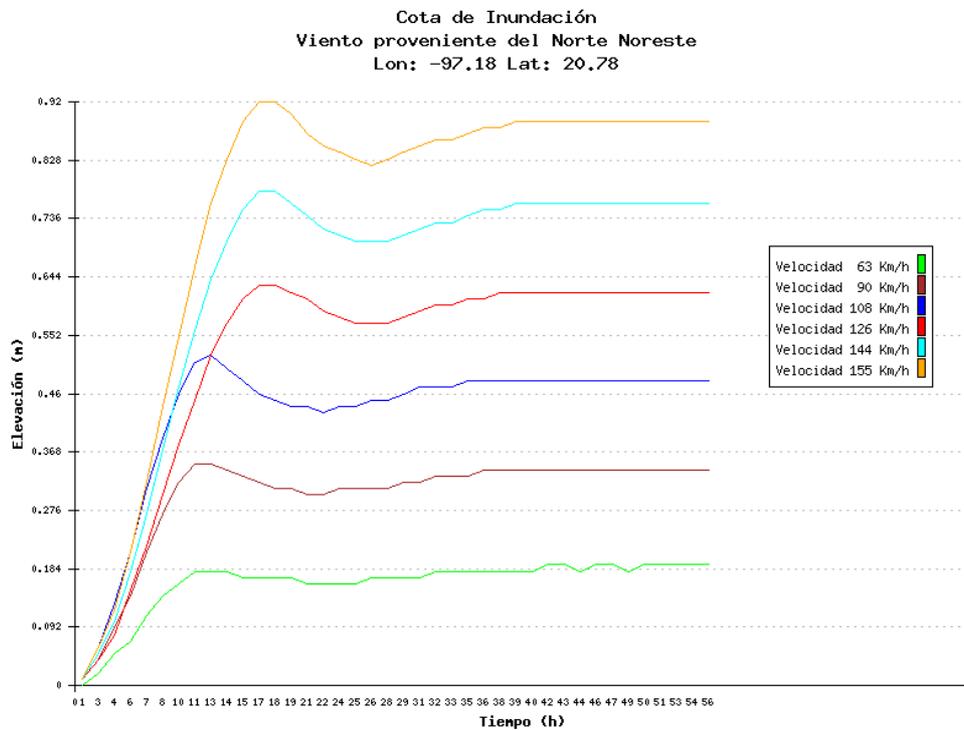
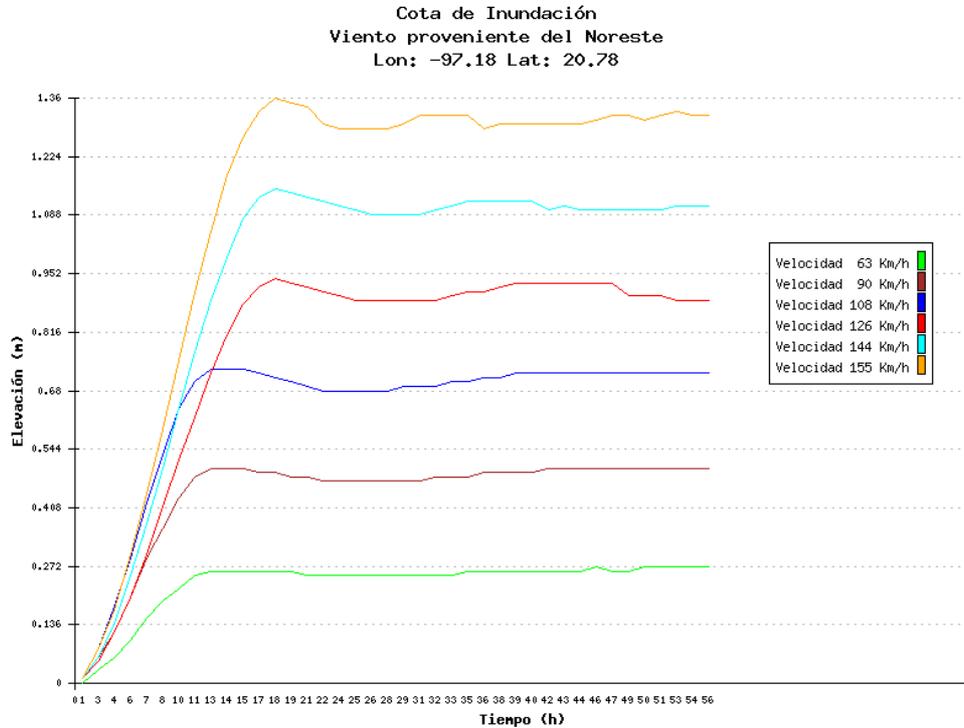
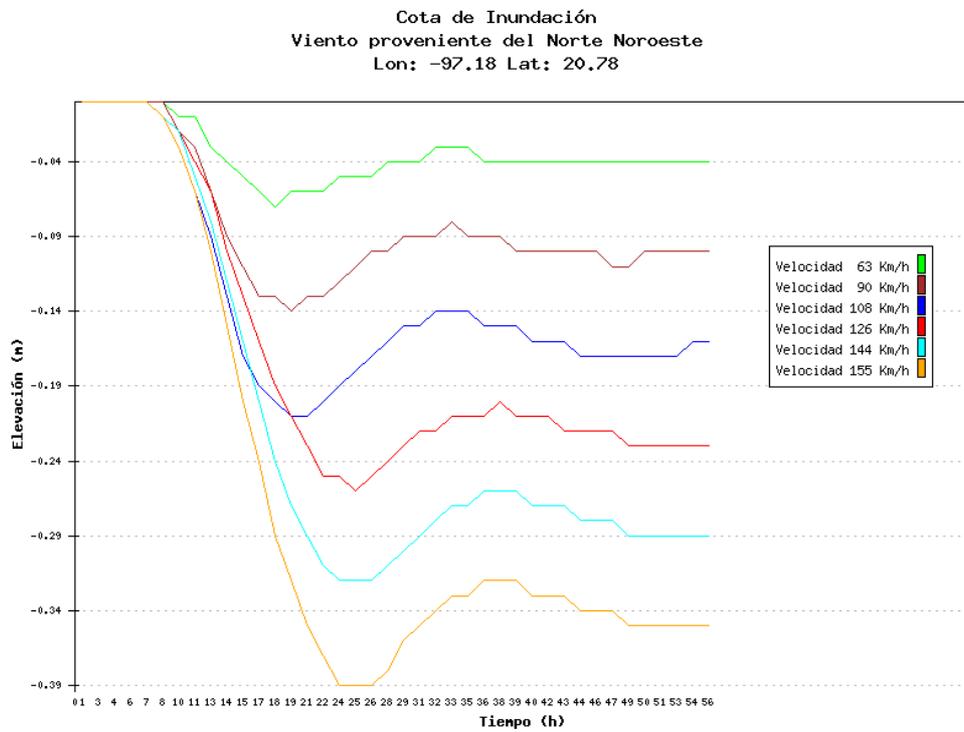
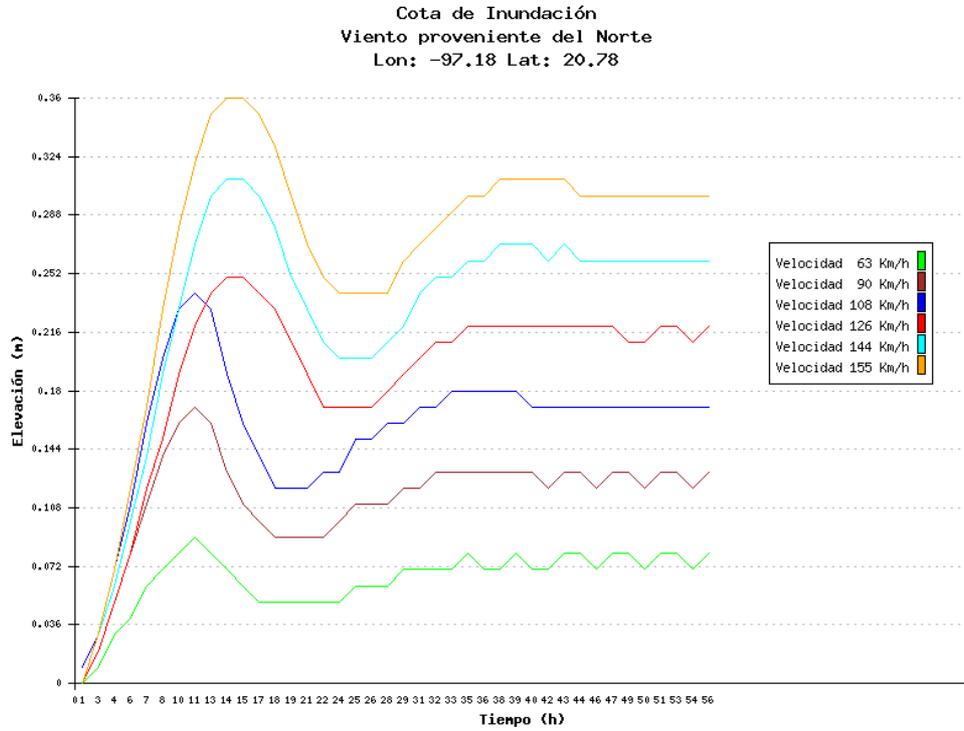


Figura 10. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -90.60 y 19.80. Estado de Campeche









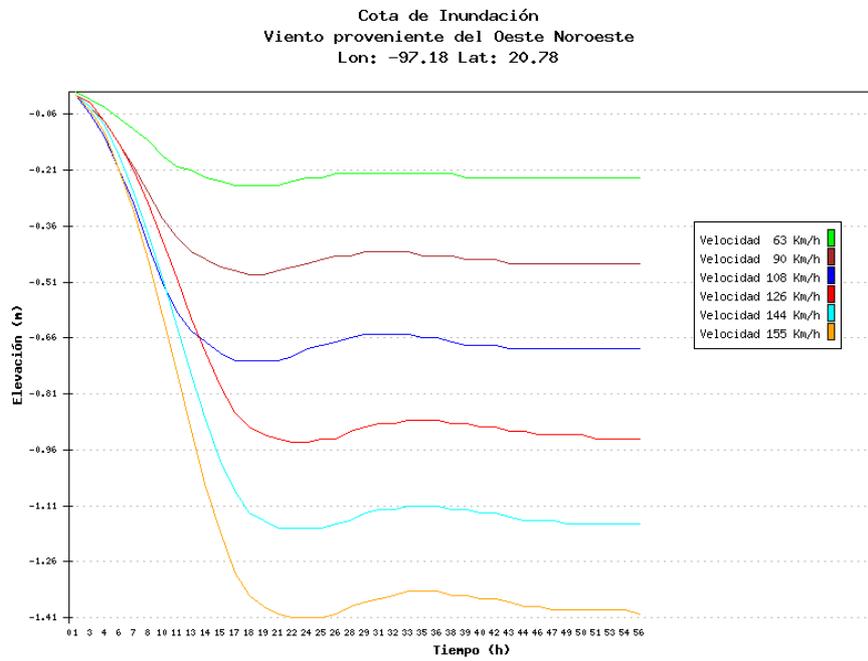
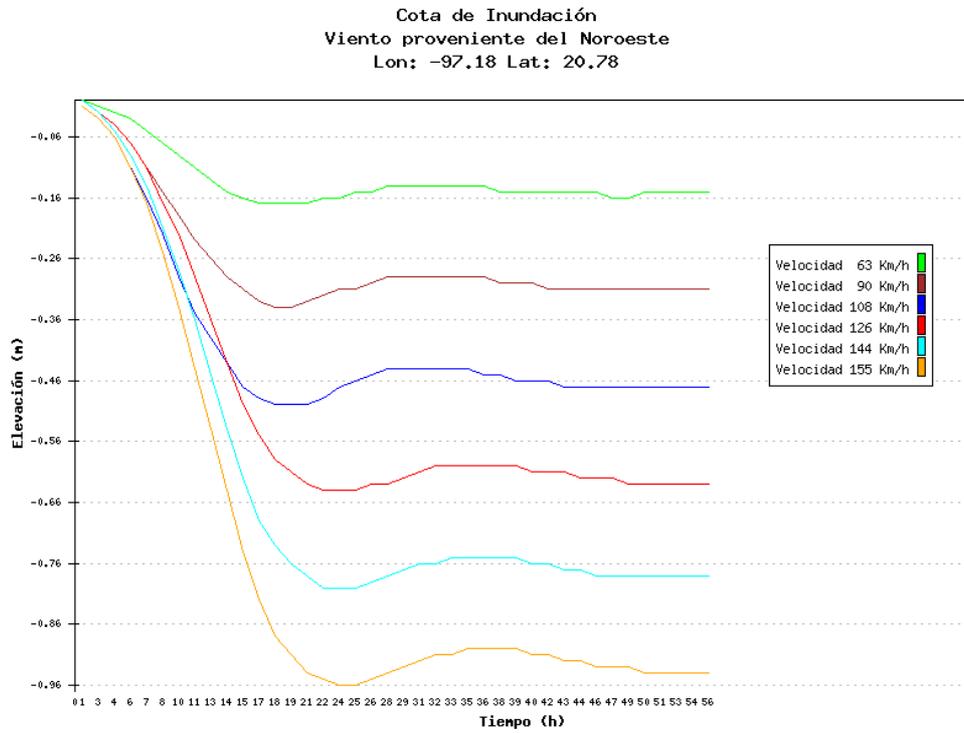
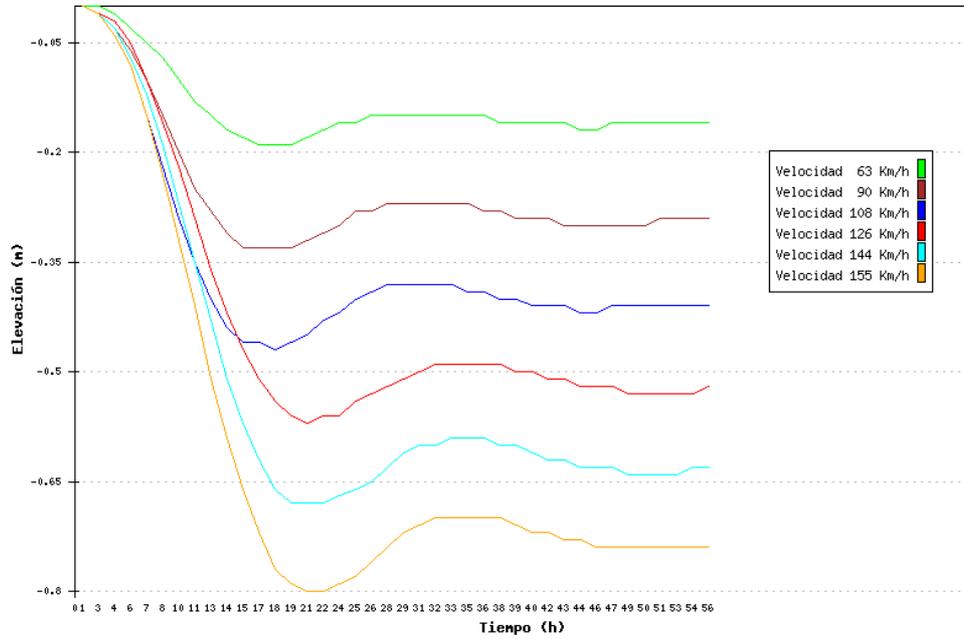
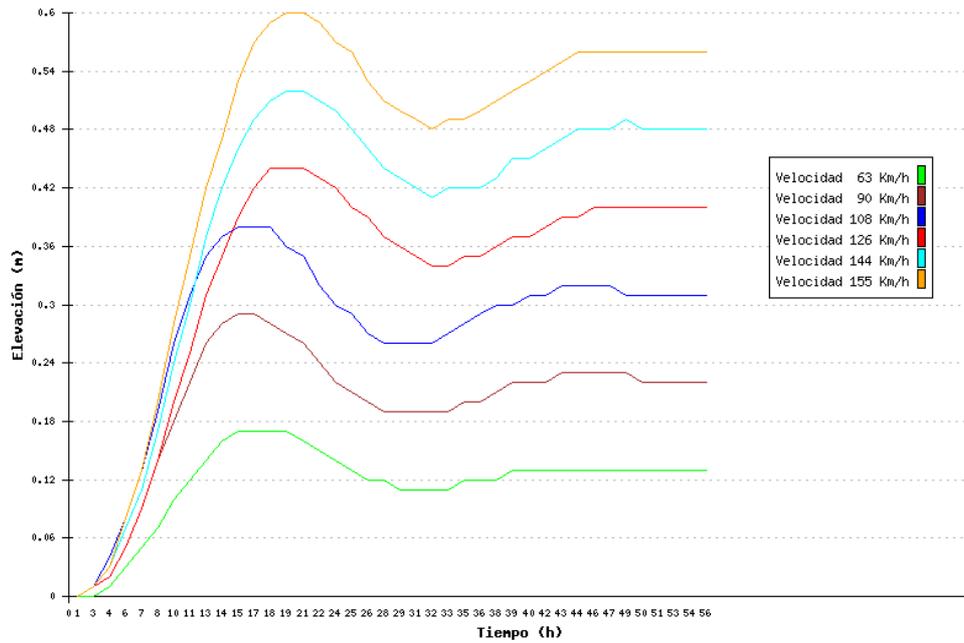


Figura 11. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -97.18 y 20.78. Estado de Veracruz

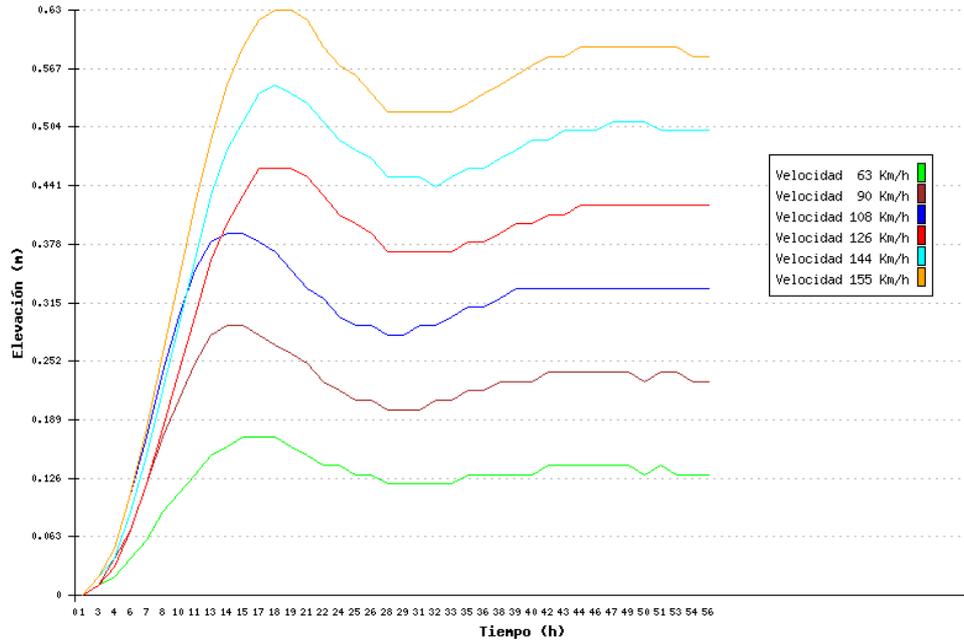
Cota de Inundación
Viento proveniente del Oeste
Lon: -94.8 Lat: 18.55



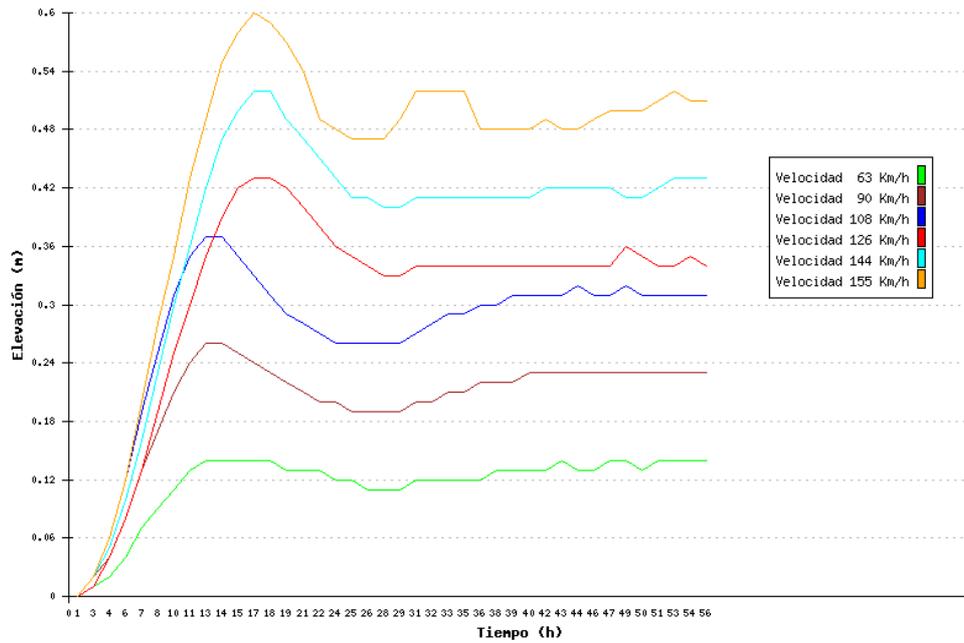
Cota de Inundación
Viento Proveniente del Este
Lon: -94.8 Lat: 18.55



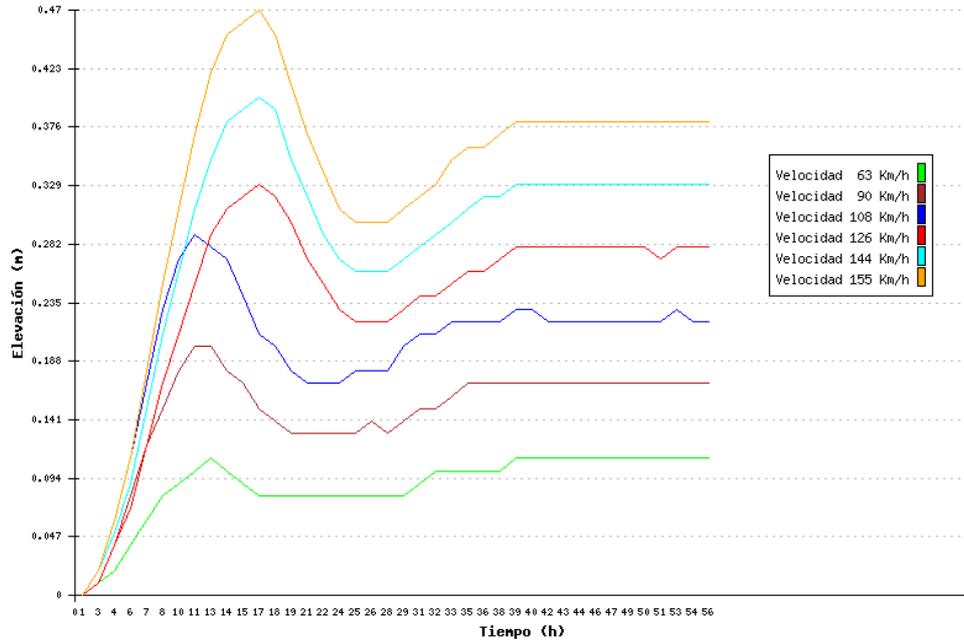
Cota de Inundación
 Viento Proveniente del Este Noreste
 Lon: -94.8 Lat: 18.55



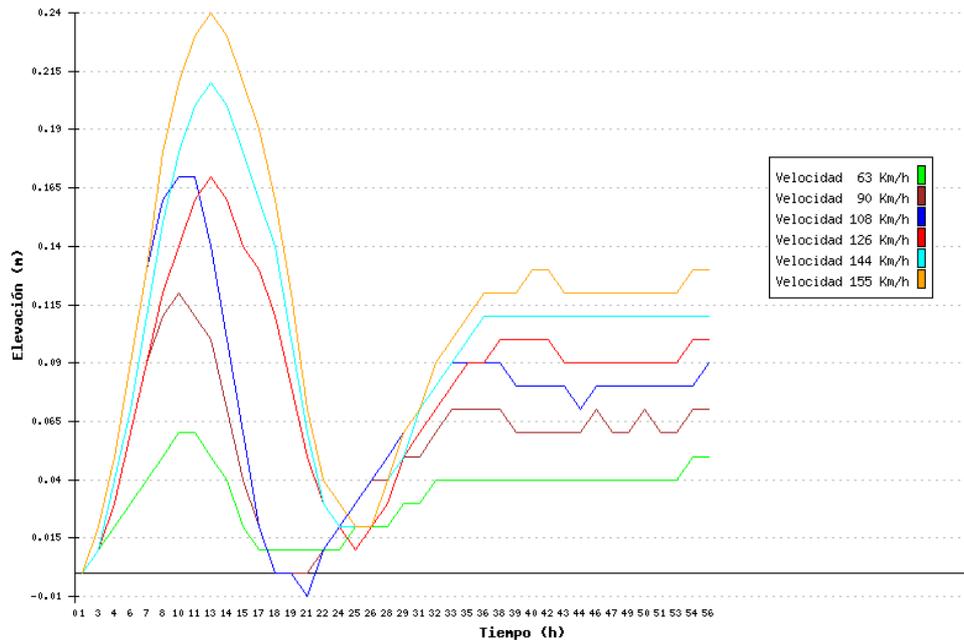
Cota de Inundación
 Viento proveniente del Noreste
 Lon: -94.8 Lat: 18.55



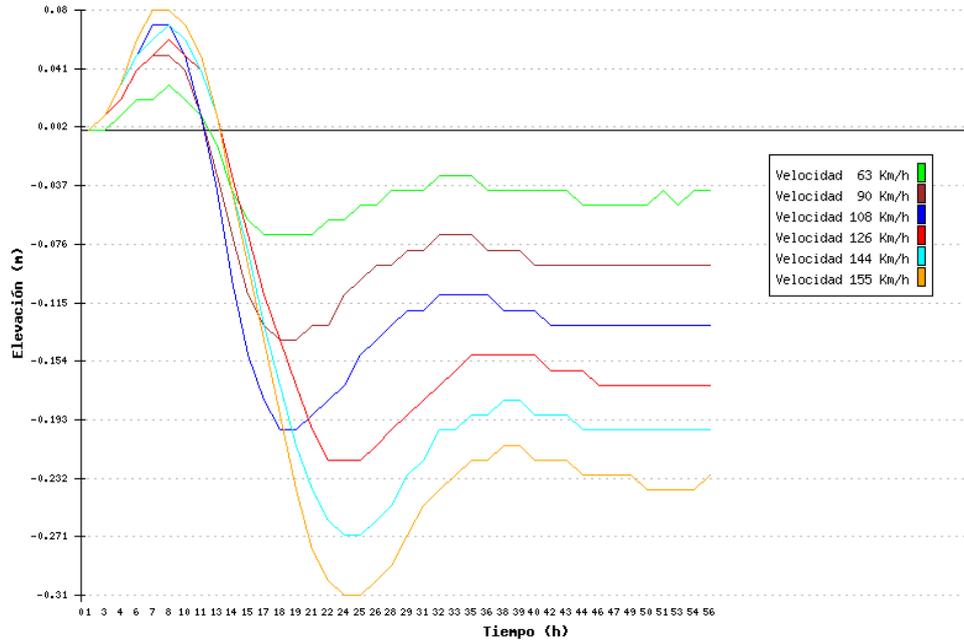
Cota de Inundación
Viento proveniente del Norte Noreste
Lon: -94.8 Lat: 18.55



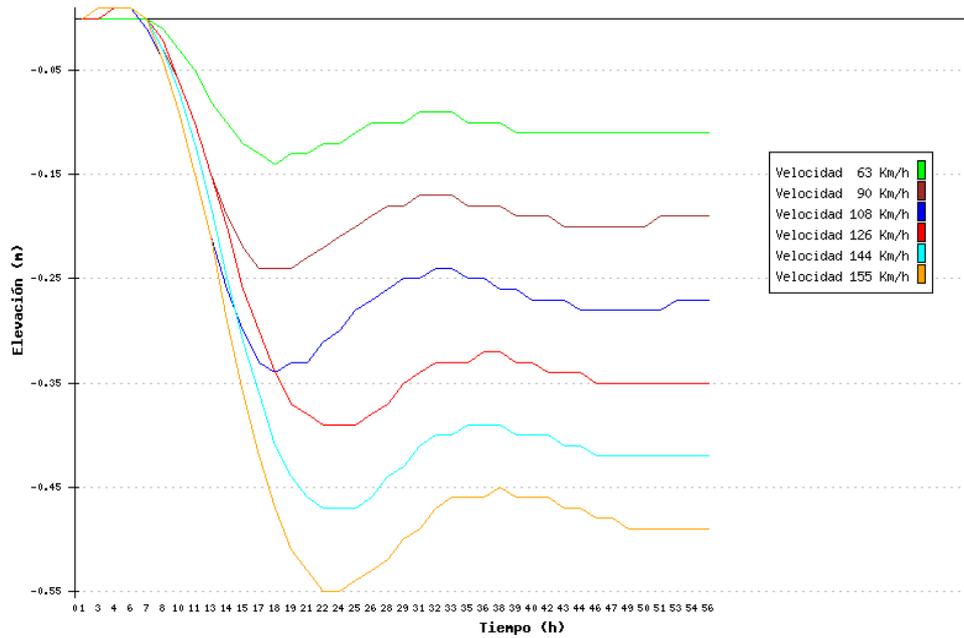
Cota de Inundación
Viento proveniente del Norte
Lon: -94.8 Lat: 18.55



Cota de Inundación
 Viento proveniente del Norte Noroeste
 Lon: -94.8 Lat: 18.55



Cota de Inundación
 Viento proveniente del Noroeste
 Lon: -94.8 Lat: 18.55



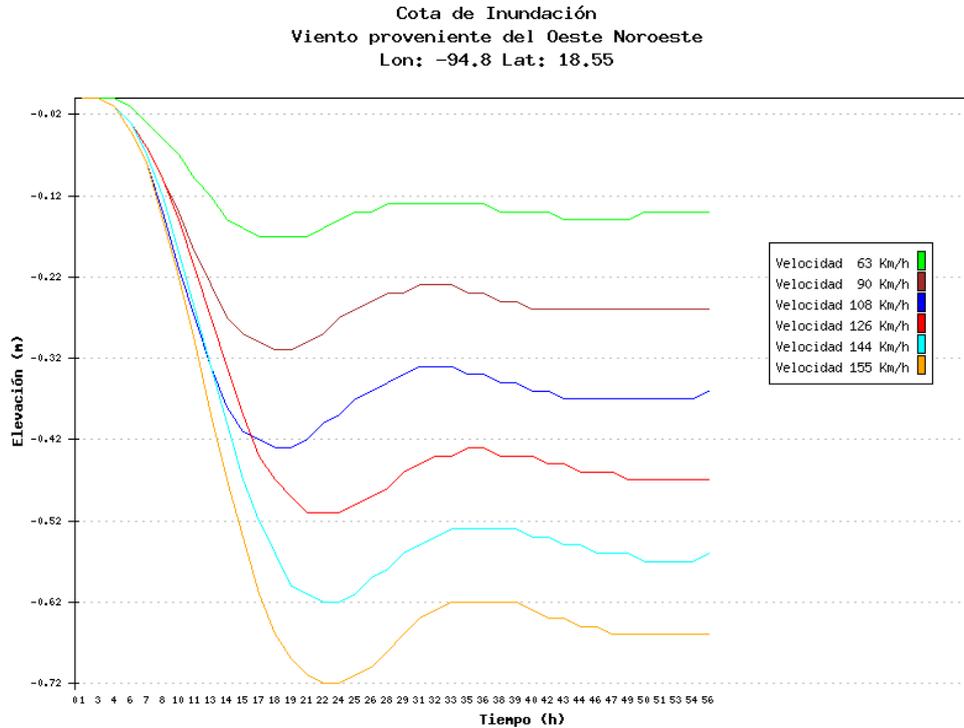
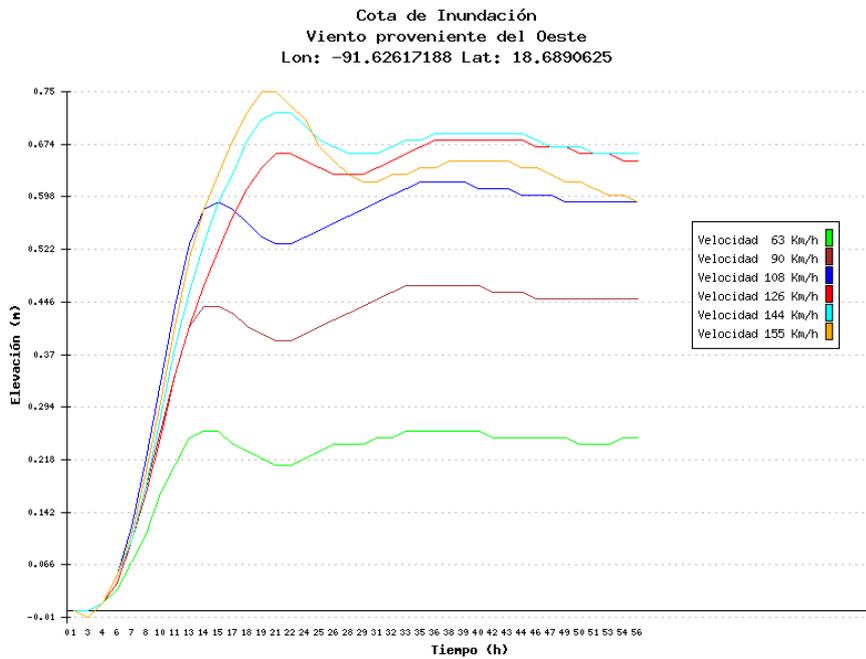
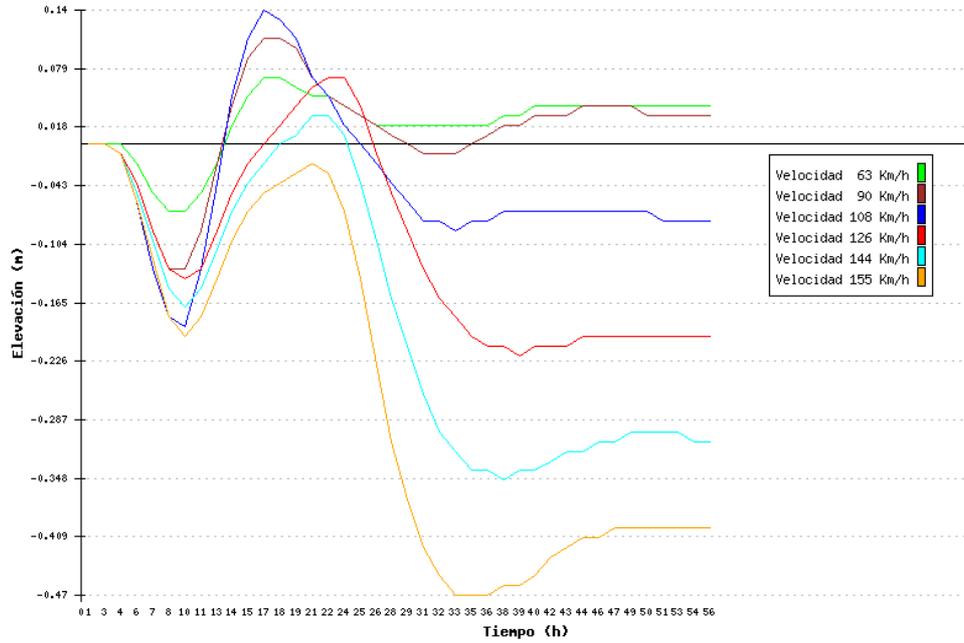


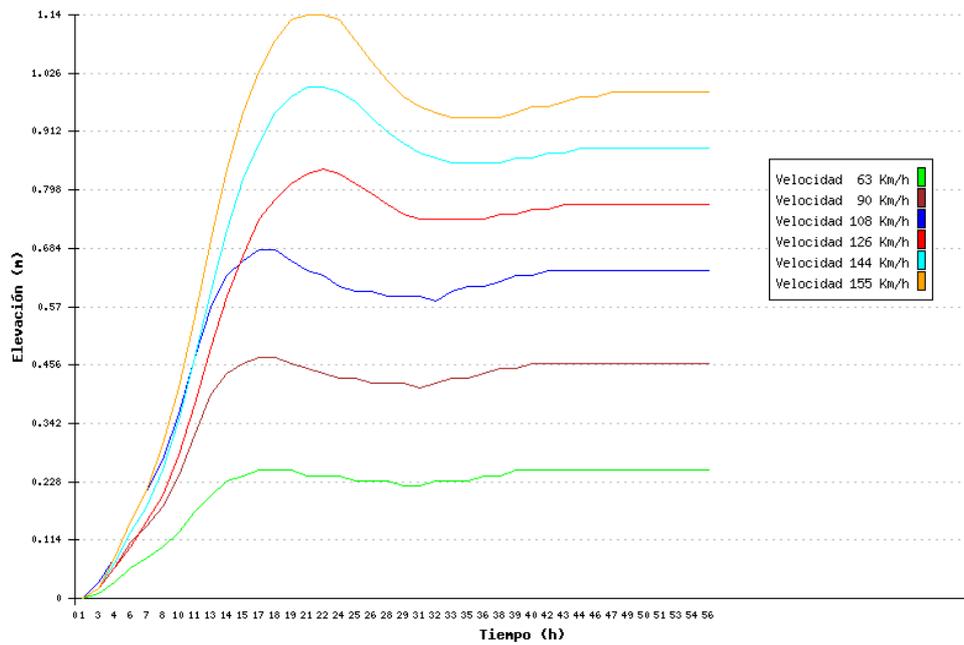
Figura 12. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -94.8 y 18.55. Estado de Veracruz

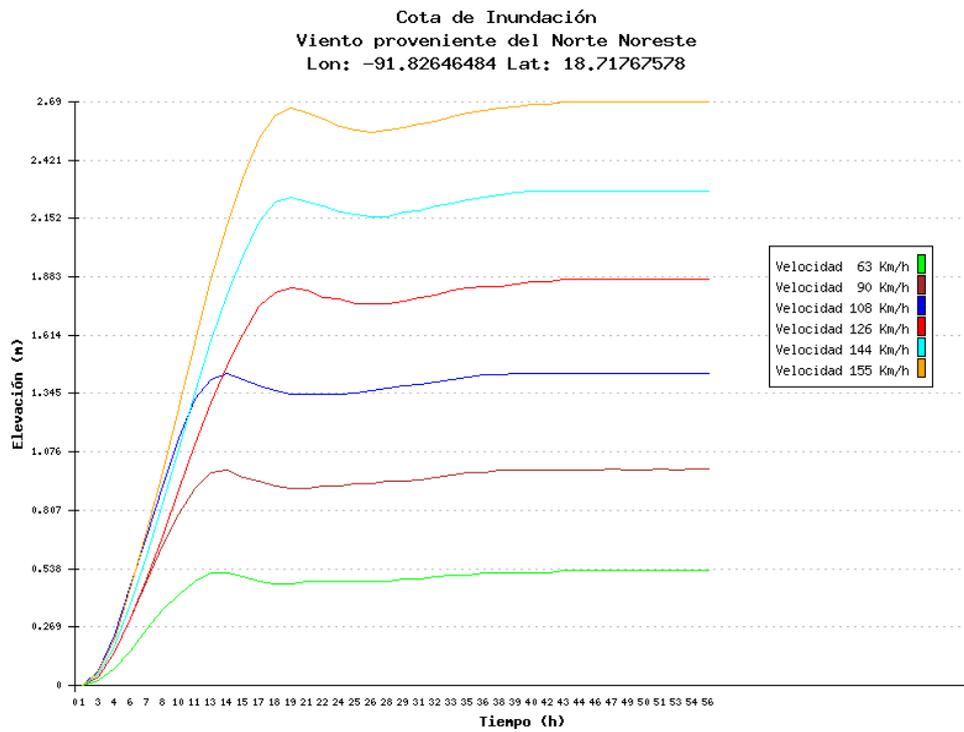
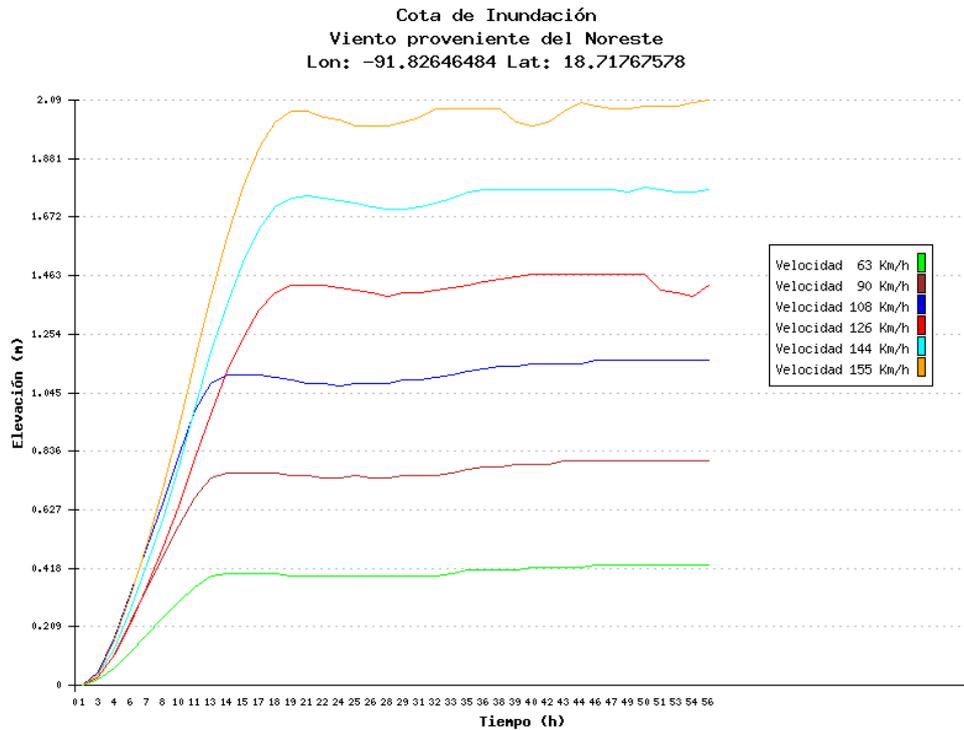


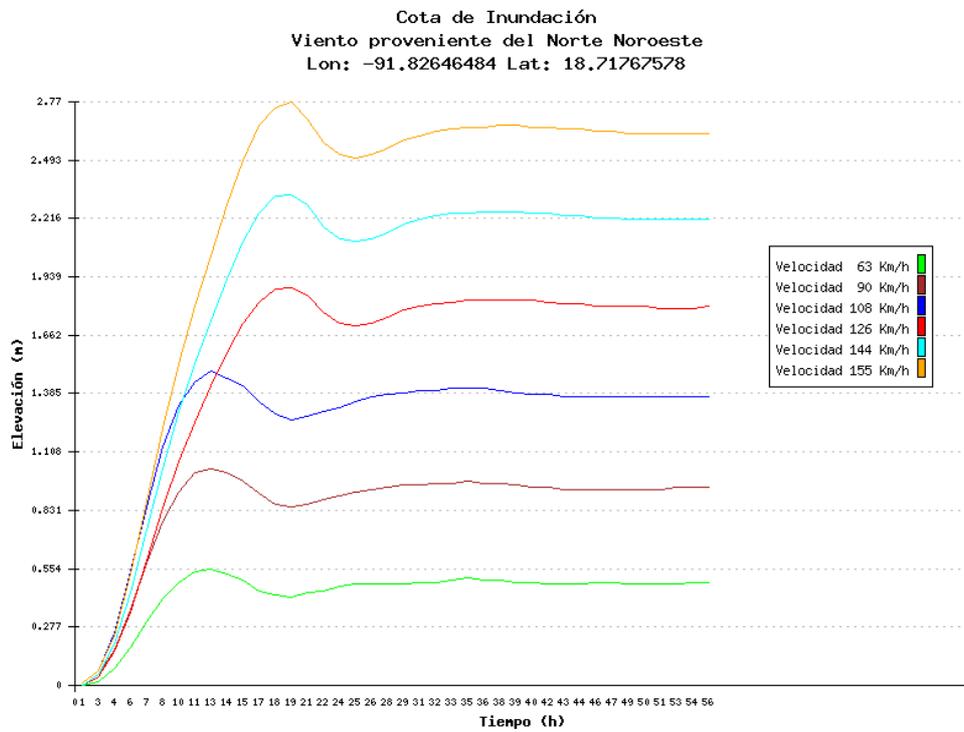
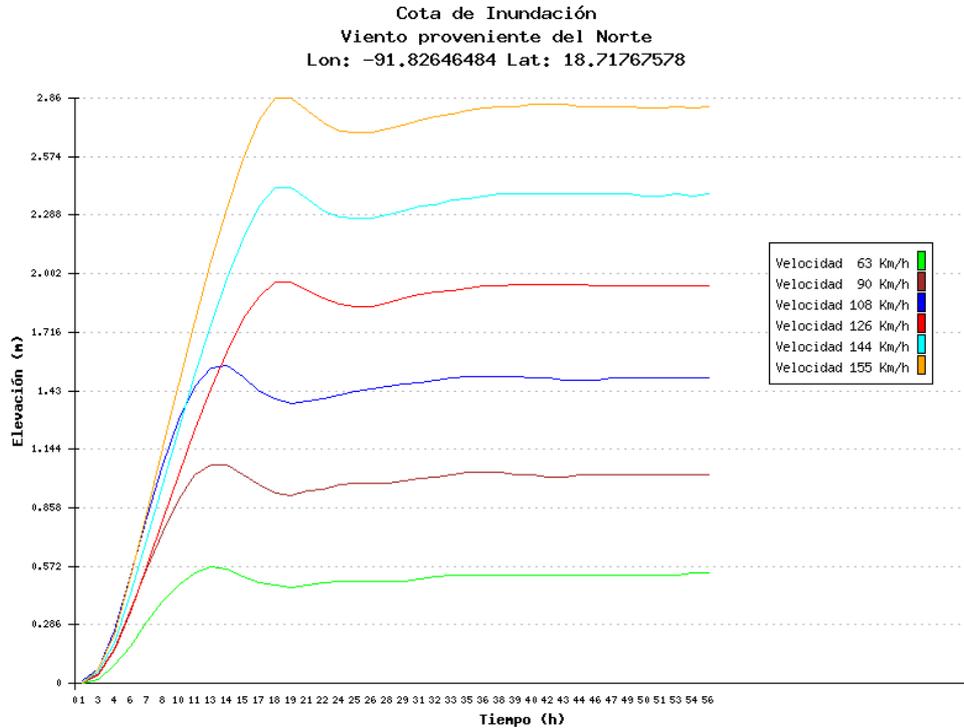
Cota de Inundación
 Viento Proveniente del Este
 Lon: -91.82646484 Lat: 18.71767578



Cota de Inundación
 Viento Proveniente del Este Noreste
 Lon: -91.82646484 Lat: 18.71767578







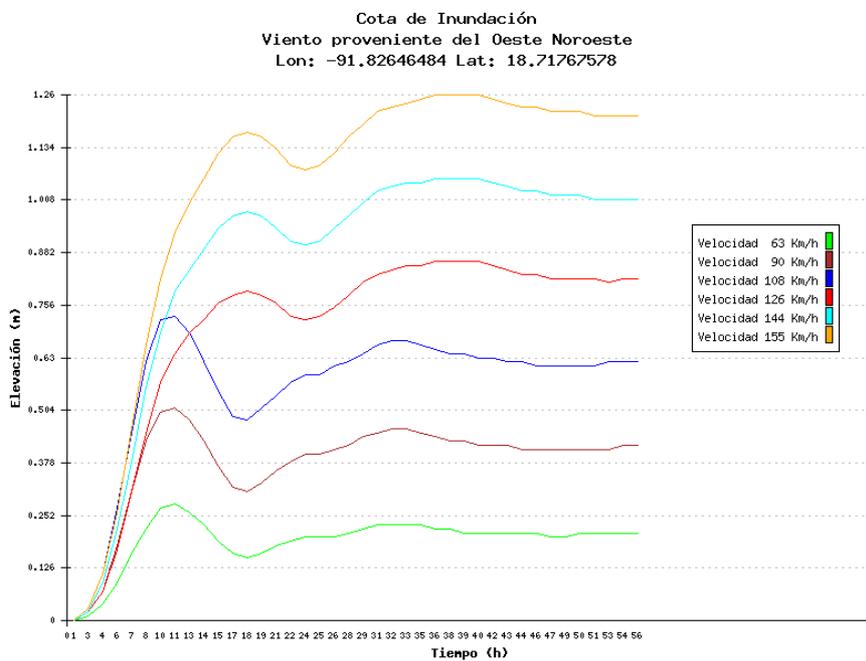
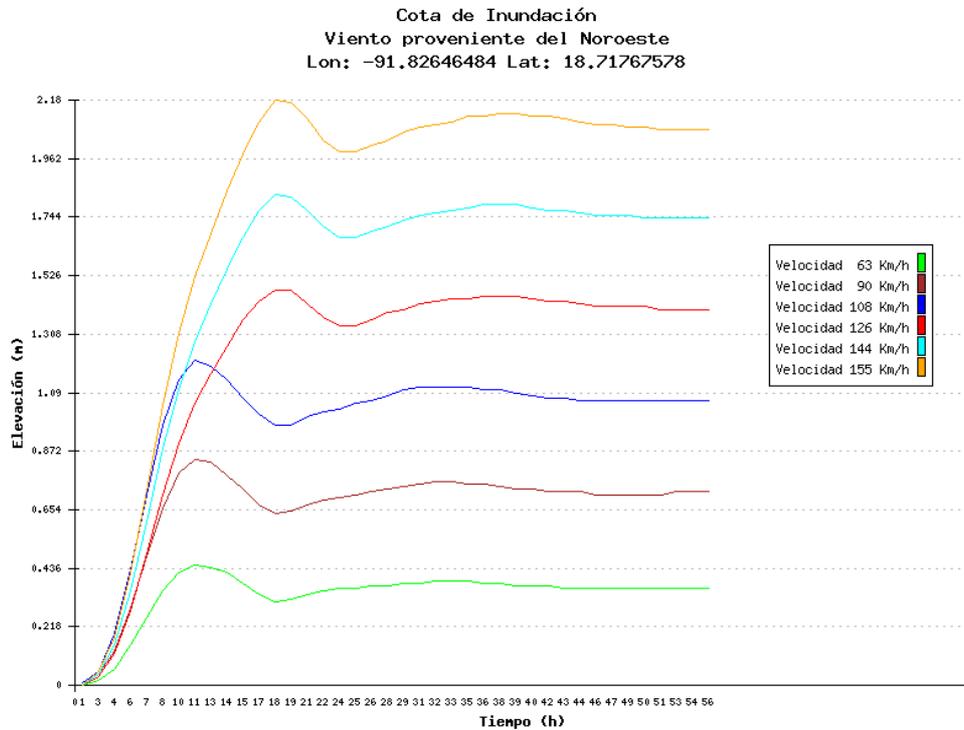
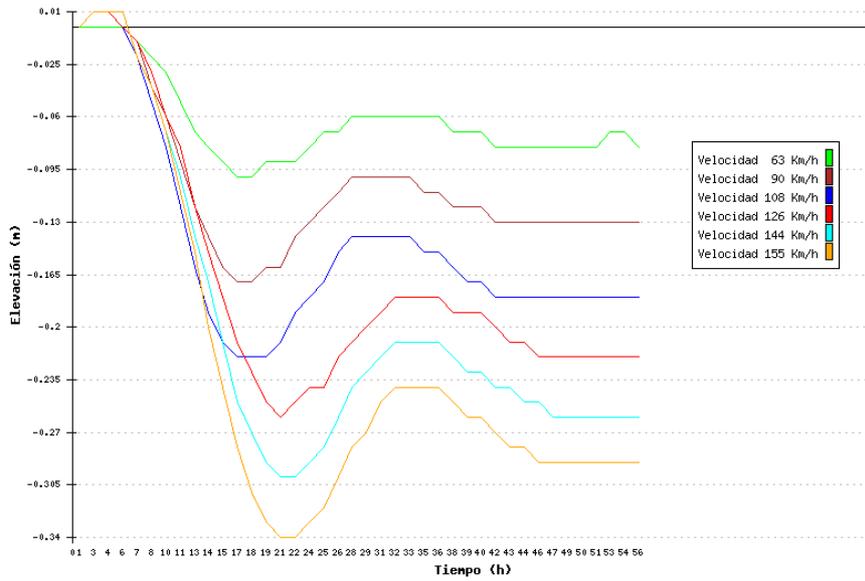
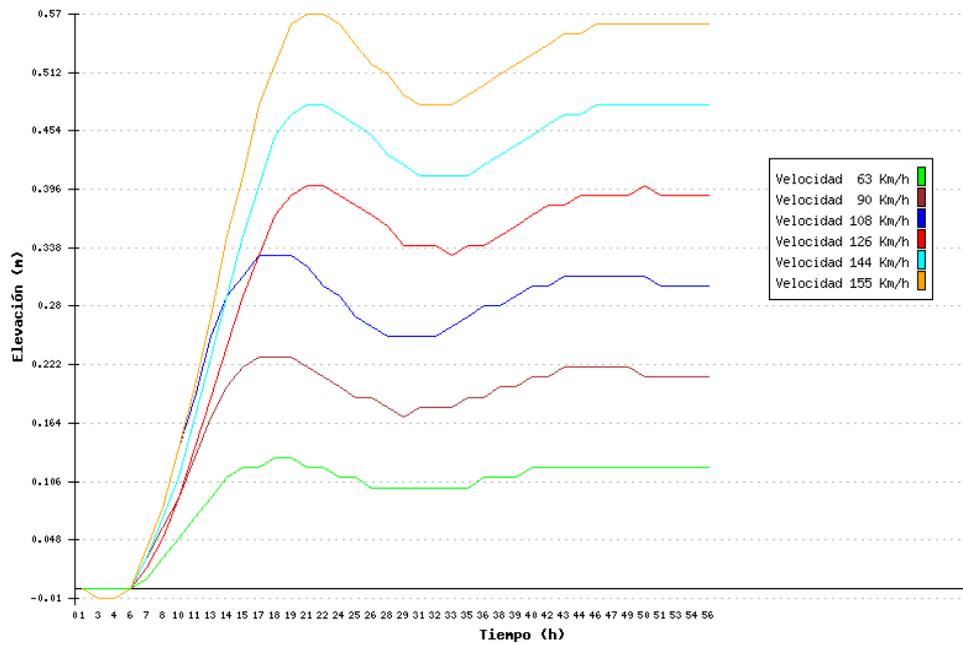


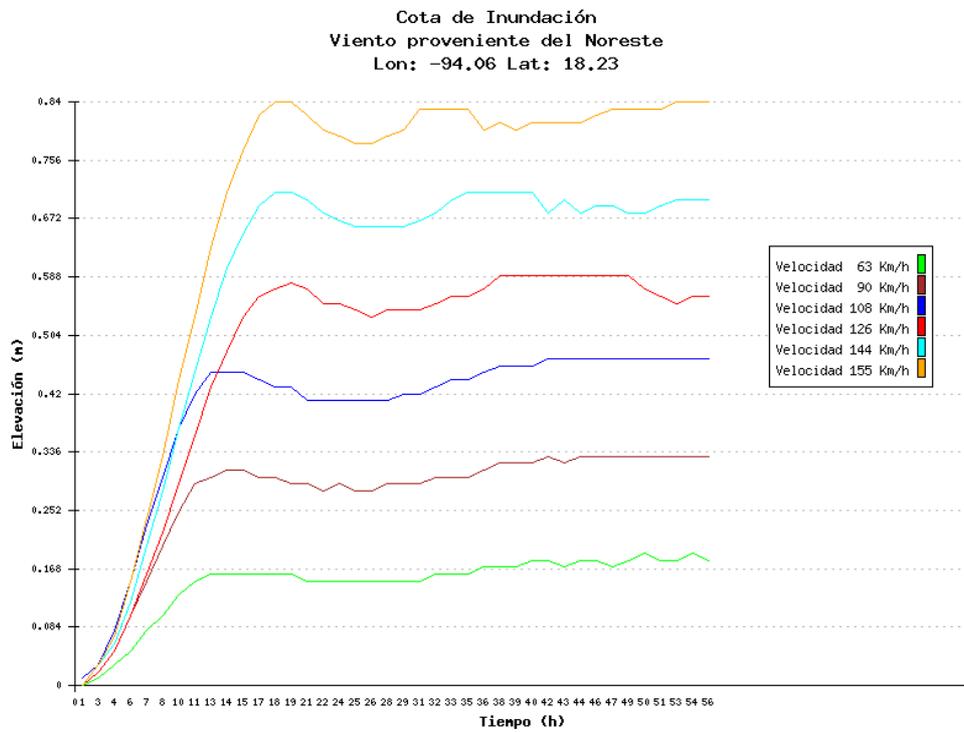
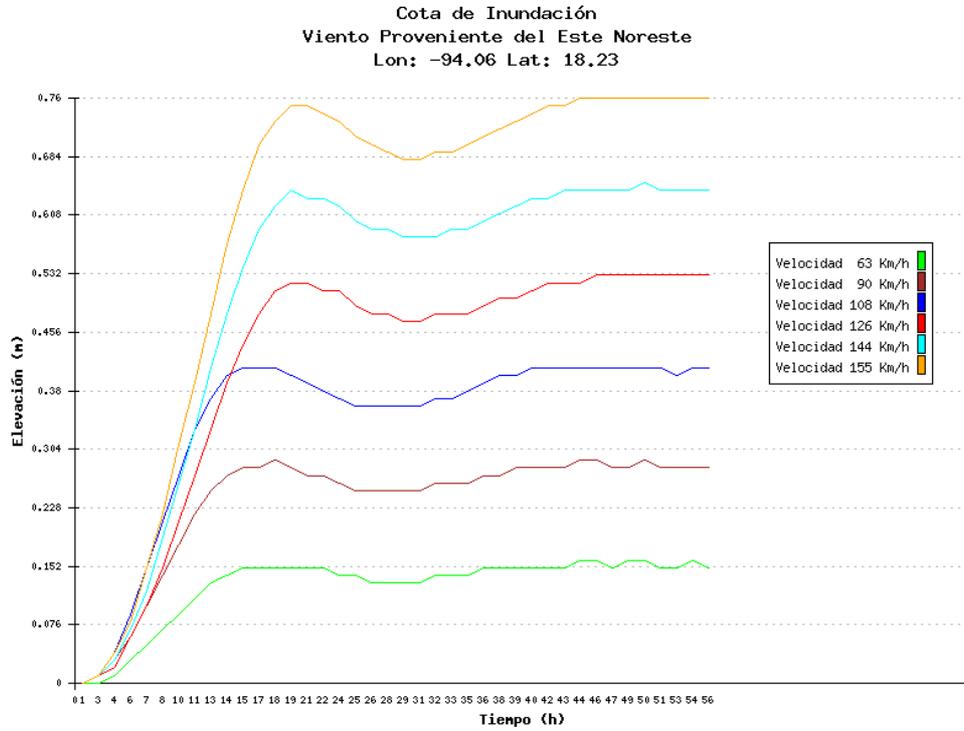
Figura 13. Gráficas en las nueve direcciones en la celda con coordenadas -91.83 y 18.72. Ciudad del Carmen

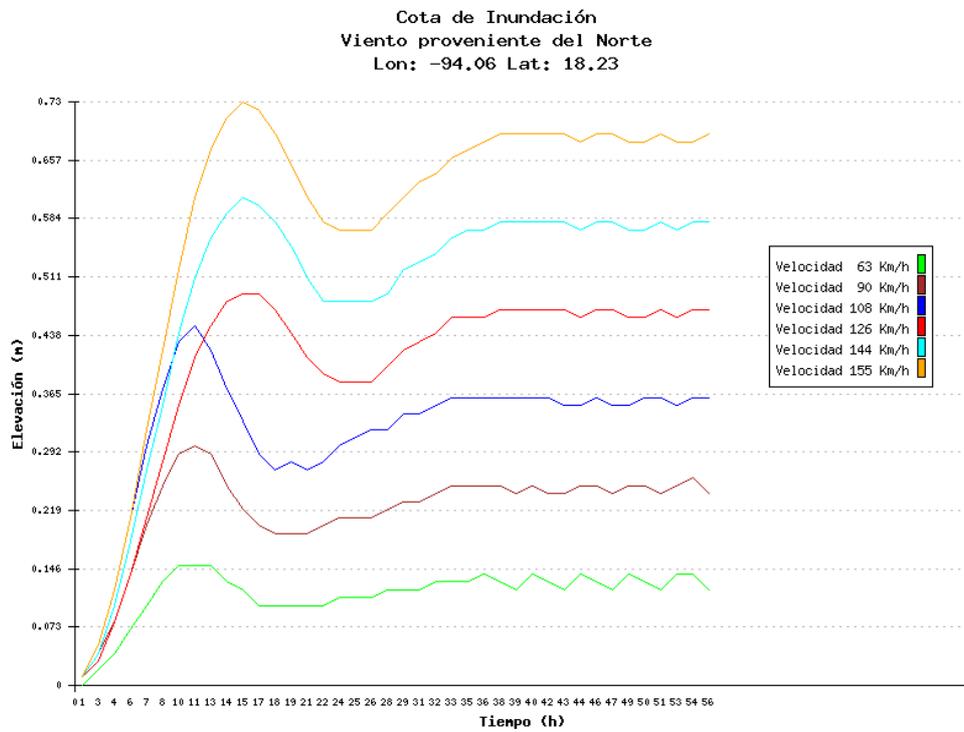
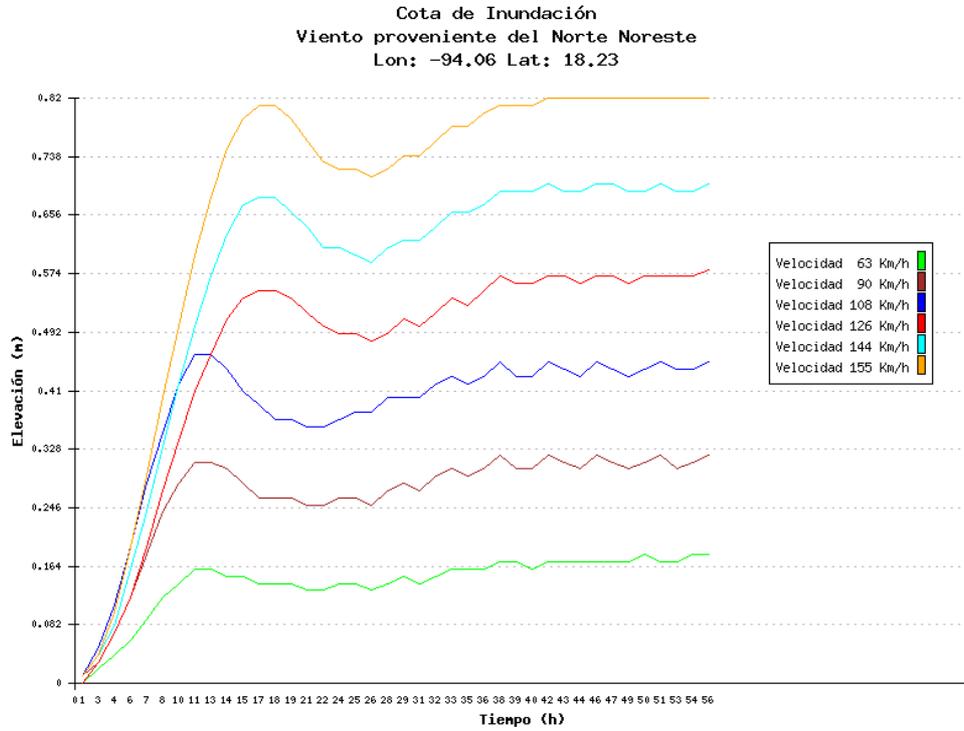
Cota de Inundación
 Viento proveniente del Oeste
 Lon: -94.06 Lat: 18.23



Cota de Inundación
 Viento Proveniente del Este
 Lon: -94.06 Lat: 18.23







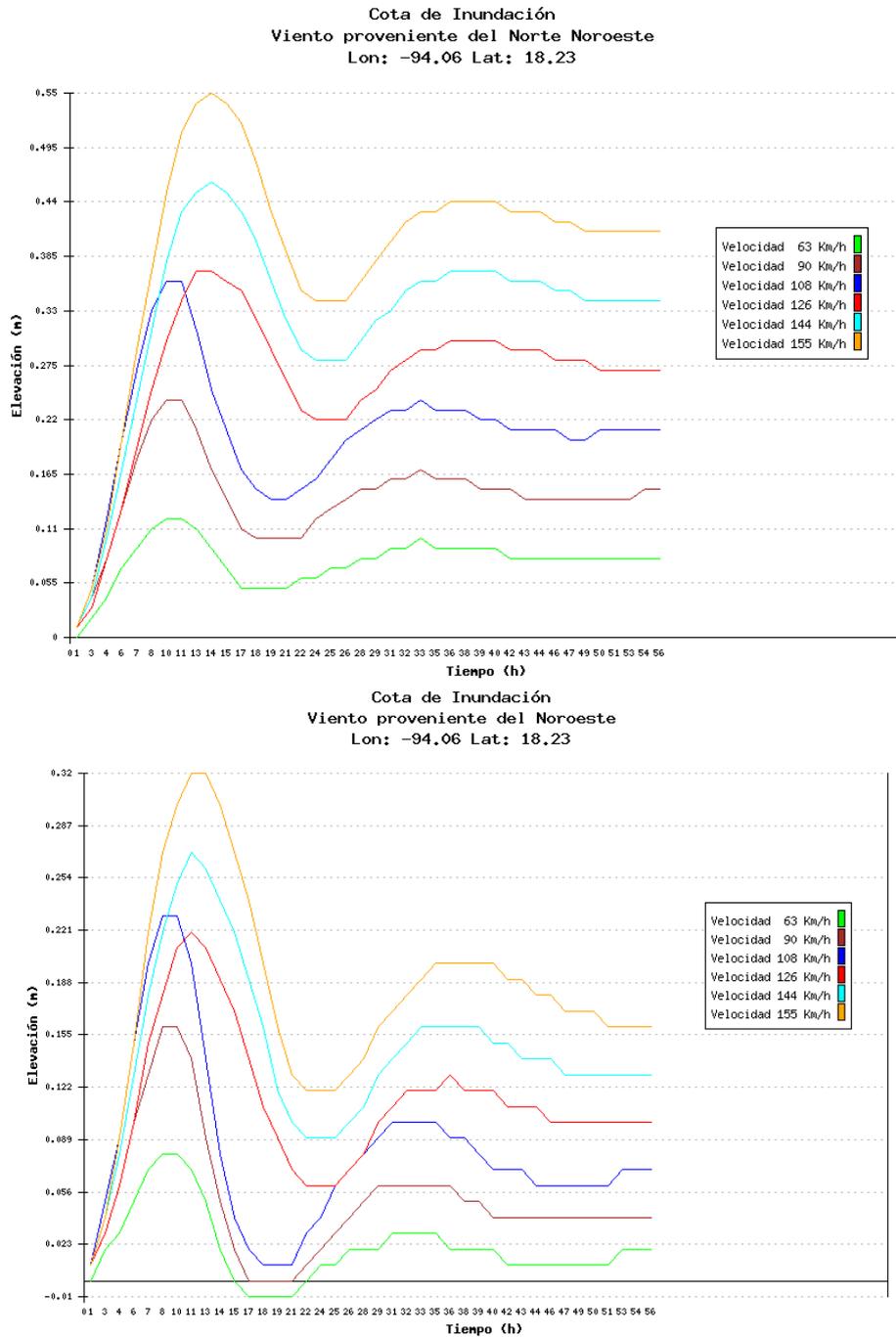


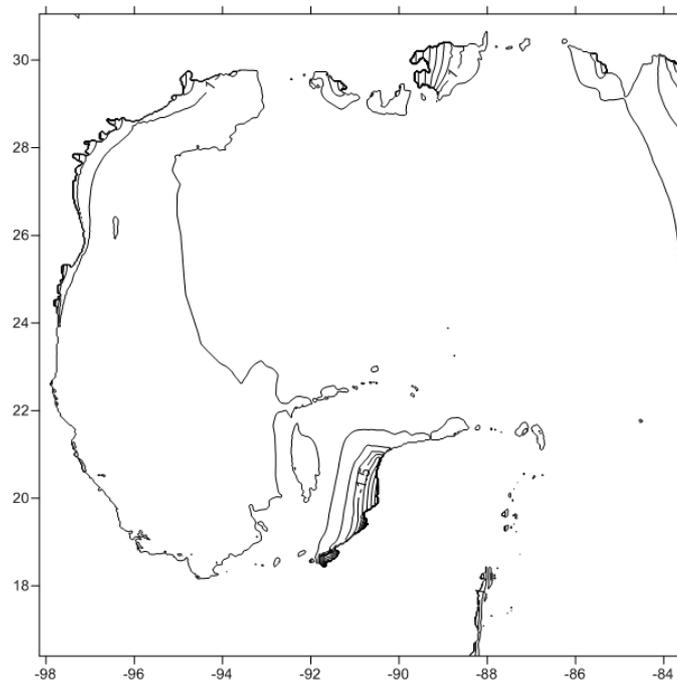
Figura 14. Efecto del en marea de tormenta de las nueve direcciones en la celda con coordenadas -94.06 y 18.23. Estado Tabasco

6.10 Generación de mapas de zonas de inundación para cada zona costera y sus variantes en dirección e intensidad de viento.

Se definieron tres mallas, una para el Golfo de México y dos para el océano pacífico, dentro de cada una de las mallas se generaron mapas para las nueve direcciones en sus seis velocidades de viento.

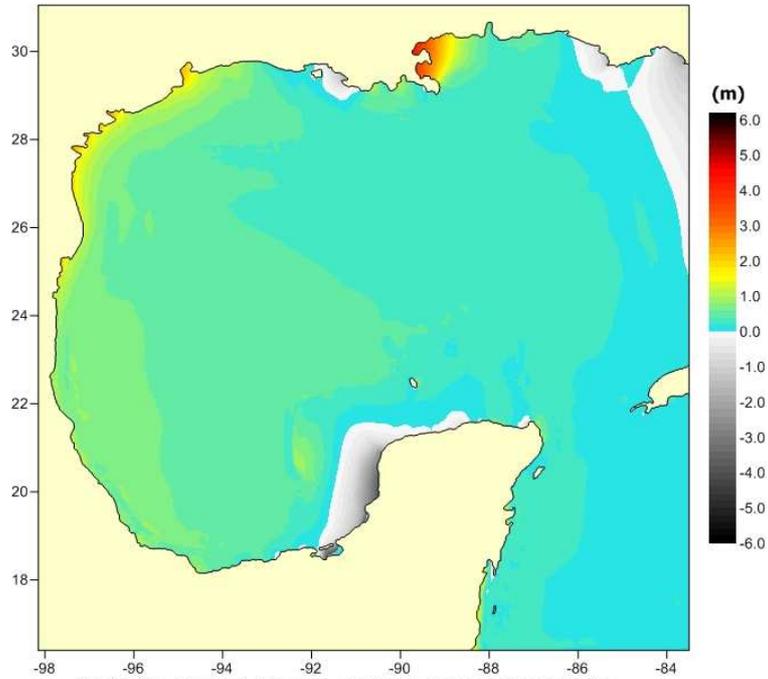
Los mapas fueron generados con los datos obtenidos del modelo hidrodinámico, y con las mallas propuestas por el Instituto de Ingeniería, tomando como base los números de celdas obtenidos para la realización de las gráficas de cota de inundación.

El software utilizado para la creación de los mapas es Surfer 9.0, al cual se introducía un archivo con extensión grd, con el siguiente formato:

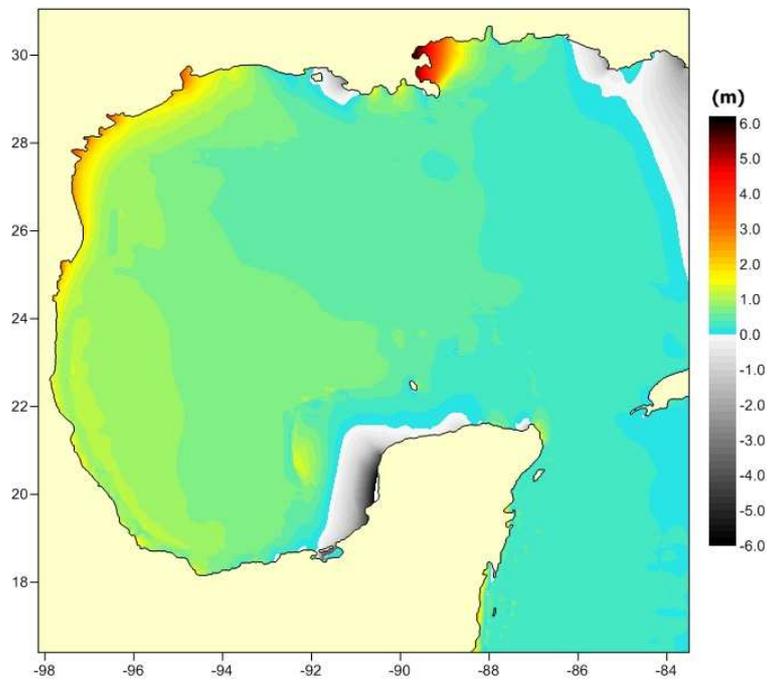


A continuación se muestran algunos ejemplos del tipo de gráficos de marea de tormenta obtenidos para diferentes direcciones y velocidades de viento.

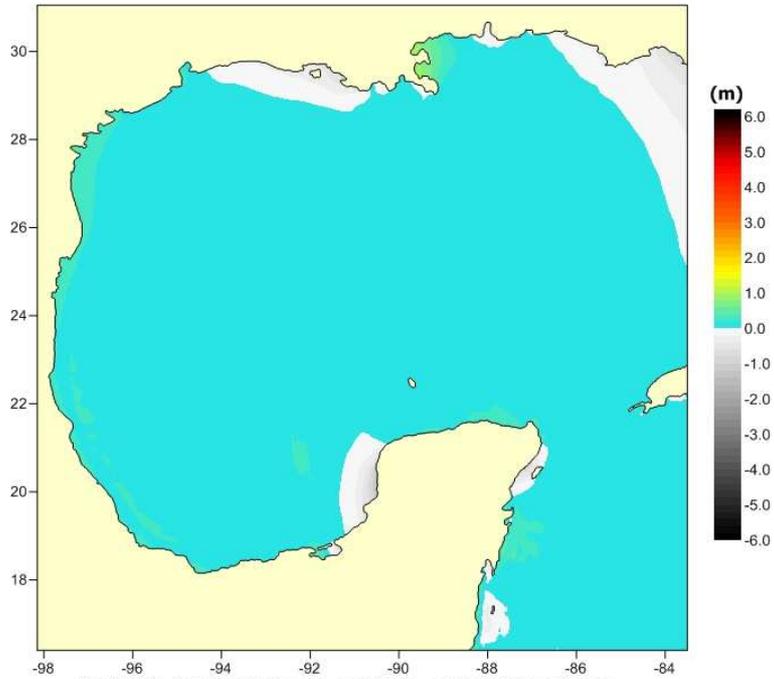
Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Este, con una velocidad de 126 km/h



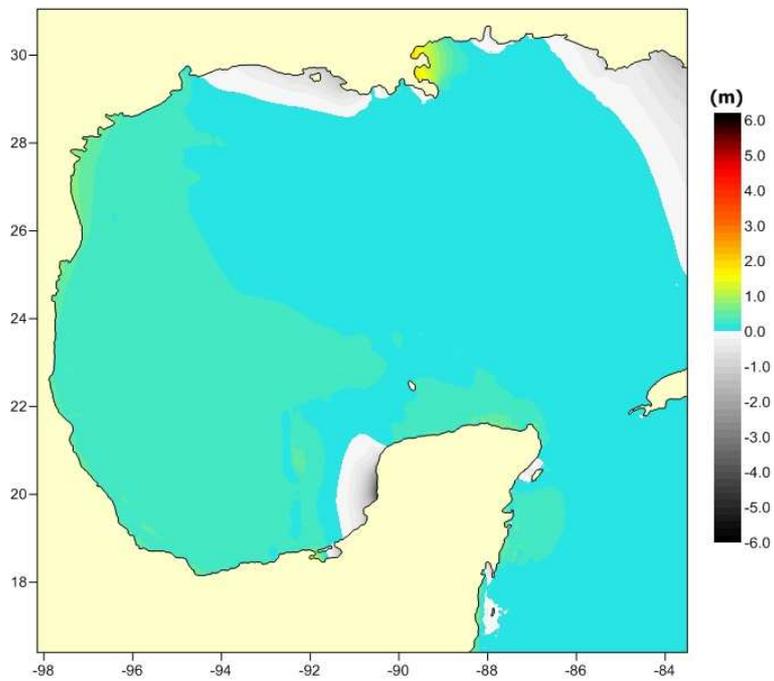
Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Este, con una velocidad de 155 km/h



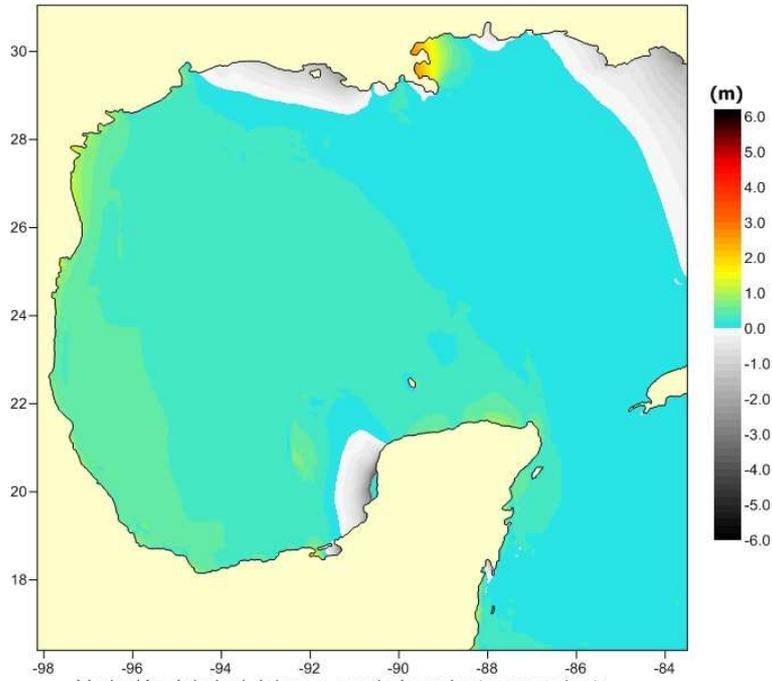
Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Este Noreste, con una velocidad de 63 km/h



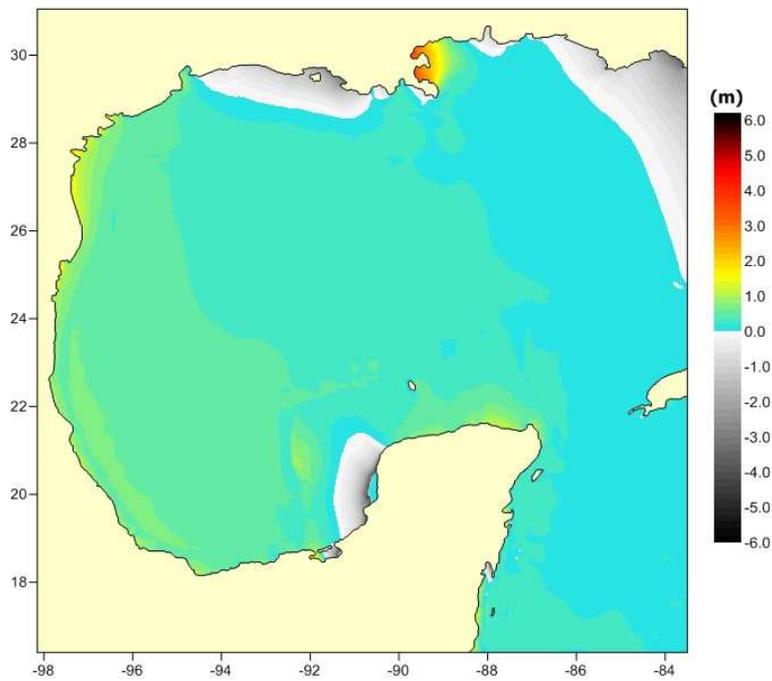
Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Este Noreste, con una velocidad de 90 km/h



Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Este Noreste, con una velocidad de 108 km/h



Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Este Noreste, con una velocidad de 126 km/h



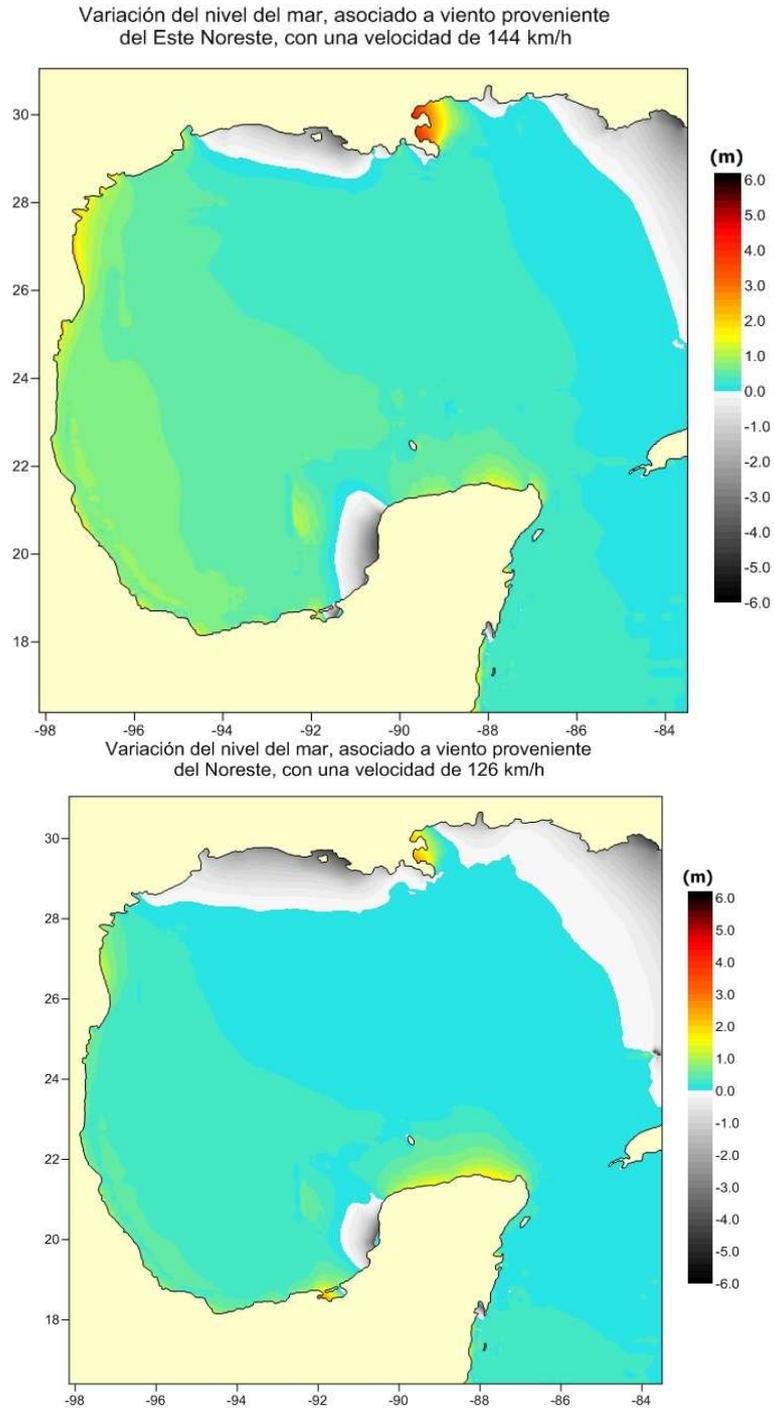
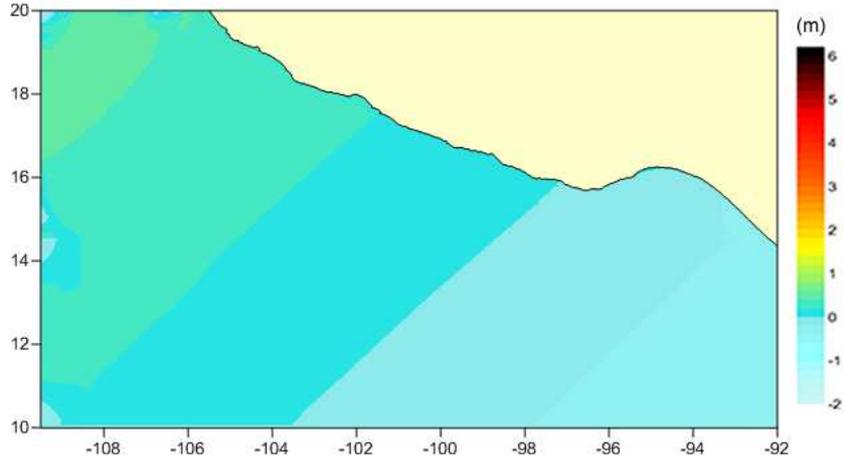
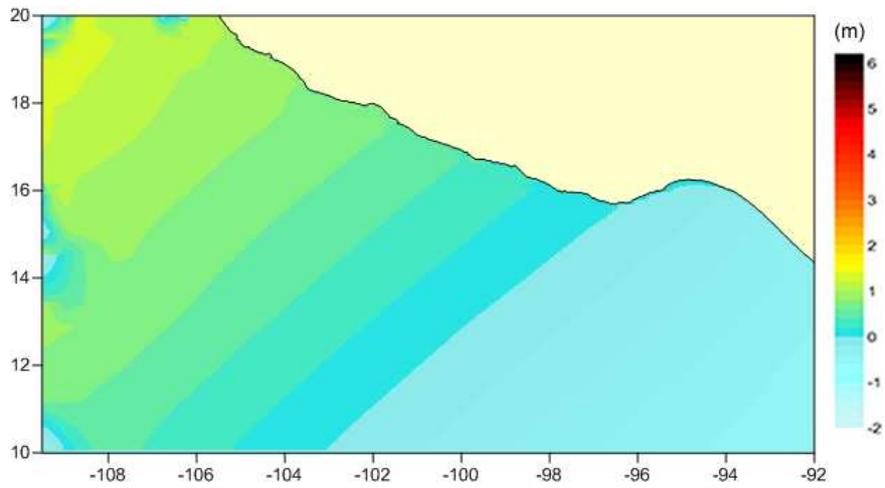


Figura 15. Ejemplos de los mapas de inundación en el Golfo de México

Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Sureste, con una velocidad de 63 km/h



Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Sureste, con una velocidad de 108 km/h



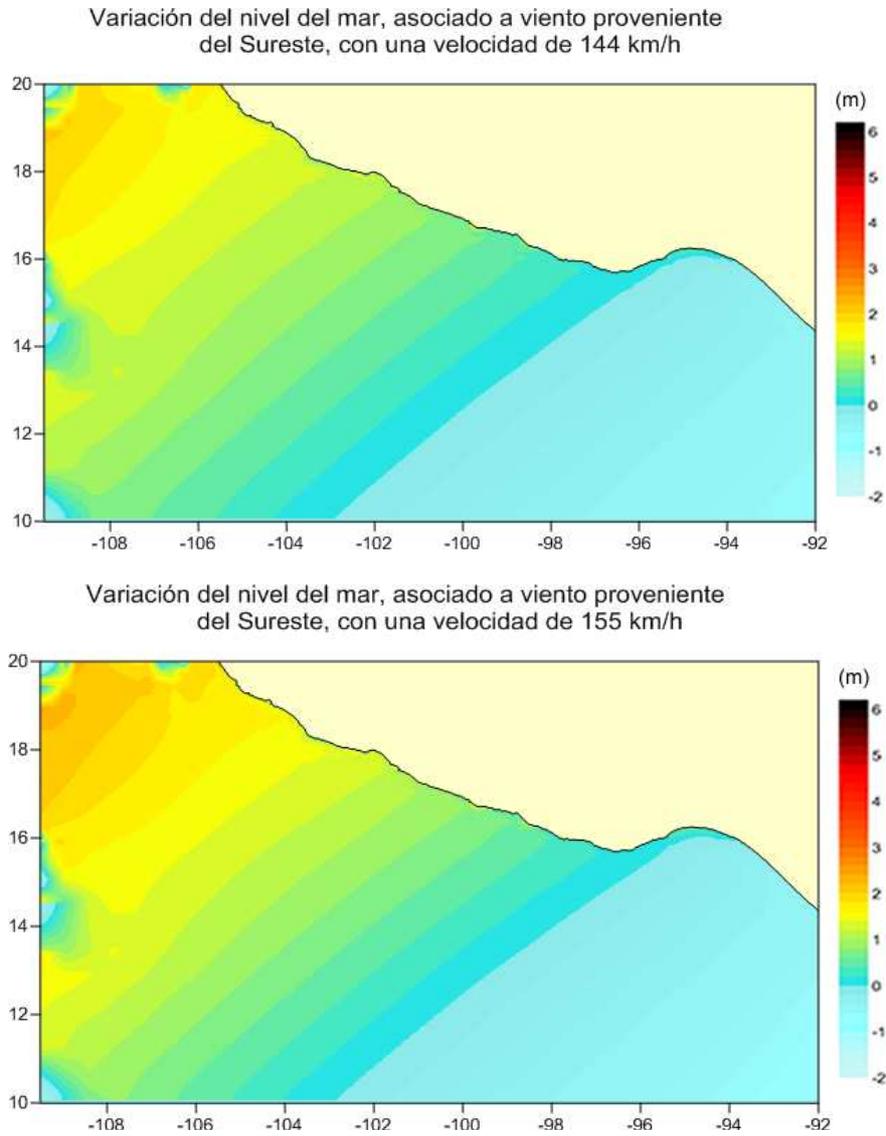


Figura 16. Ejemplos de los mapas de inundación en el Pacífico Sur.

6.11 Descripción del sitio de consulta dinámico WEB.



Definición y origen de la marea de tormenta

La marea de tormenta es una anomalía del nivel medio del mar causado por el viento asociado a tormentas (ciclones) y del gradiente horizontal de presión atmosférica superficial que se genera a su paso.

Tiene una escala espacial similar al tamaño del ciclón tropical o tormenta tropical que la genera y cuya duración es de varias horas dependiendo del tamaño del ciclón y de la velocidad con la que éste viaja. En aguas profundas, el esfuerzo del viento de un ciclón genera rotación en el agua y la elevación del nivel del mar es pequeña como respuesta a la baja presión en el centro del ciclón. Sin embargo los efectos dinámicos se pronuncian cuando el ciclón se acerca a la costa por los efectos de la batimetría.

En aguas someras (plataforma continental) por conservación de la vorticidad potencial se genera una marcada divergencia en las corrientes y al interactuar con la batimetría local y con la costa, se incrementa la elevación del nivel del mar con una gran variabilidad en la zona de afectación.

Cinco procesos físicos pueden afectar el nivel medio del mar durante una tormenta: presión, viento, rotación terrestre, oleaje y precipitación (Harris, 1963). Los efectos de presión de un ciclón tropical provocarán que el nivel del agua en el océano abierto aumente en las regiones de baja presión y disminuya en las de alta presión. La tensión del viento provoca un fenómeno cuyo efecto es que los niveles del mar en la costa tiendan a aumentar al disminuir éste, y viceversa. Este efecto es inversamente proporcional a la profundidad. En costa abierta, llegará a las bahías de la misma forma que sucedería si fuese una marejada astronómica.

La altura del oleaje y de amplitud de la marea en la costa dependen de la batimetría. Una pequeña elevación, o un terreno escarpado en el litoral que se hunde antes de llegar a la costa y en consecuencia da lugar a aguas de gran profundidad cerca de la línea costera producirá menor amplitud de marea de tormenta, pero oleaje más alto. Esto se ha observado a lo largo de la costa sudeste de Florida.

El extremo del "Floridian Plateau", donde el agua profunda alcanza los 91 metros, está a sólo 3 km de la costa de Palm Beach (Florida); a 7 km, la profundidad cae hasta los 180 metros (Lane, 1980). El contorno de 180 metros continúa al sur de Palm Beach County y se localiza a más de 30 km al este de los Cayos superiores.

Inversamente, las líneas costeras a lo largo del Golfo de México desde Texas a Florida descienden de manera suave. En la costa del Golfo en Florida, el extremo del Floridian Plateau se encuentra a más de 160 km de la Isla Marco en Collier County. La Bahía de Florida, entre los Cayos de Florida y tierra firme, es también muy baja; las profundidades varían típicamente entre 0.3 y 2 metros (Lane, 1981). Estas áreas están sujetas a marejadas ciclónicas más altas, pero olas más pequeñas.

Figura 17. Página principal del sitio WEB



Figura 18. Sección gráficas



Figura 19. Ejemplo selección estado de Tamaulipas

Principal Gráficas Mapas Enlaces Participantes

Tamaulipas Lon: -97.78 Lat: 24.41

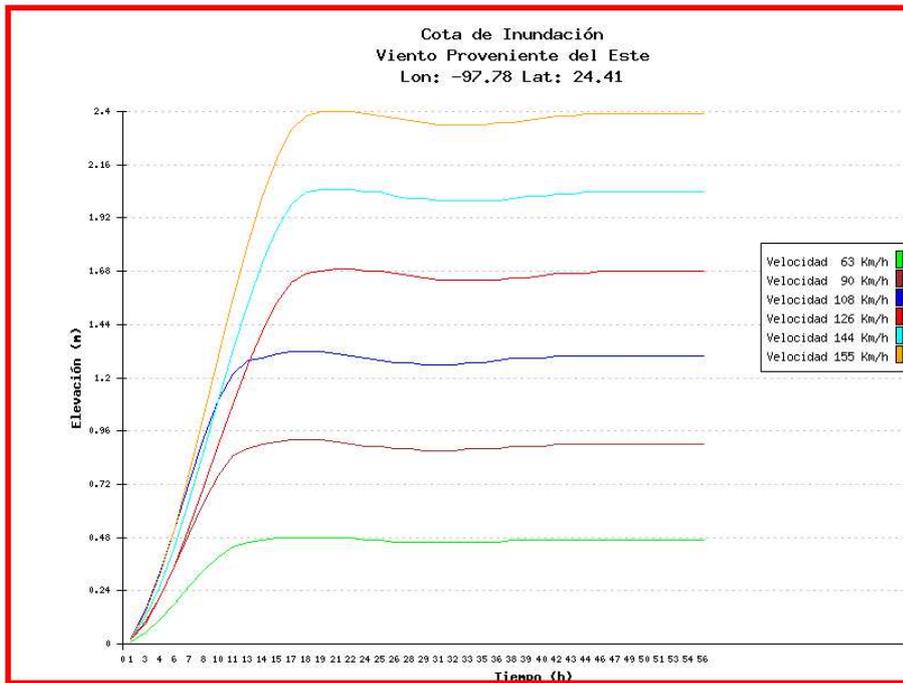


Figura 20. Ejemplo de graficas generadas del estado de Tamaulipas con coordenadas -97.78, 24.41



Figura 21. Sección mapas



Variación del nivel del mar, asociado a viento proveniente del Norte, con una velocidad de 155 km/h

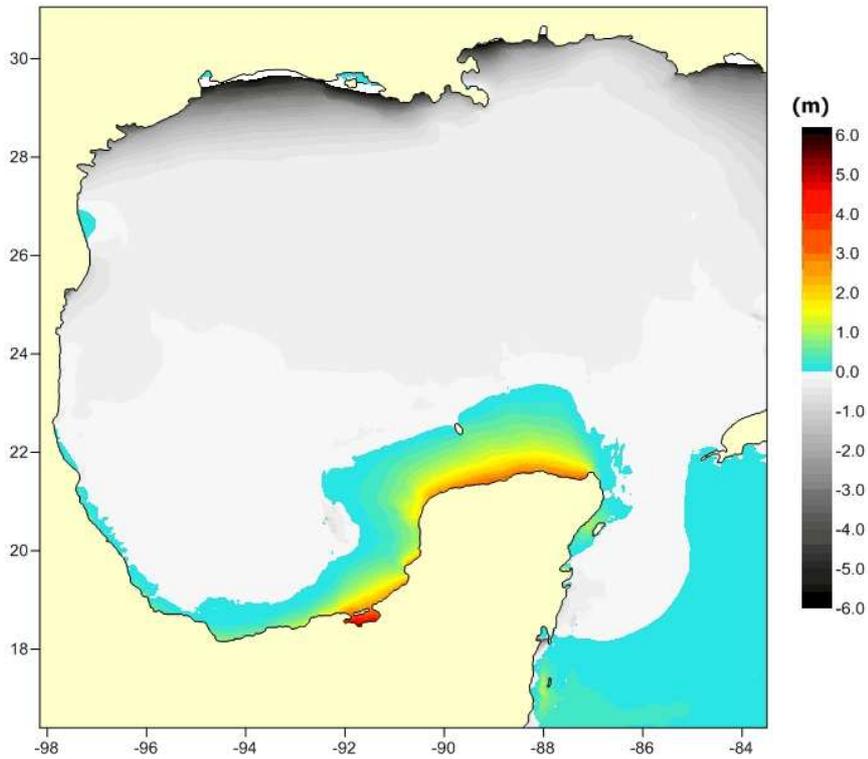


Figura 22. Ejemplo de animación para la dirección norte, zona Golfo de México



Figura 23. Sección enlaces relacionados

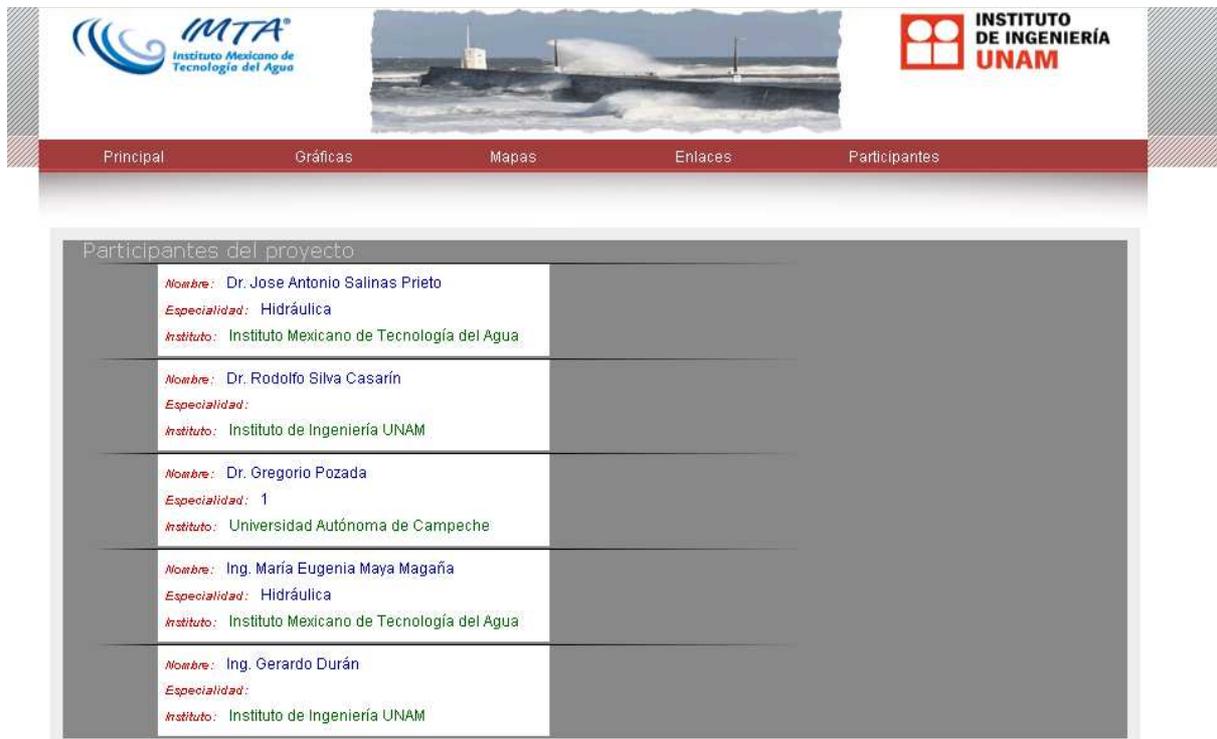


Figura 24. Sección participantes del proyecto

7. Conclusiones

Respecto a las simulaciones numéricas de marea de tormenta en el Golfo y Caribe de México, se utilizó un modelo dinámico, el cual permite evaluar la variación de la superficie libre del mar. Este modelo requiere, por una parte, información batimétrica, la cual fue obtenida de diversas fuentes de información, como son: base de datos de las campañas de campo del Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería UNAM., cartas de la Secretaría de Marina e información del National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. Una vez integrada la base de datos y aplicando algún software especializado, en este caso Golden Software Surfer, se delimita e interpola el área de estudio, generando así una malla regular, misma que es la base para generar una malla Quadtree, ésta y otras características de forzamiento iniciales, como lo son: la intensidad del viento, dirección del viento, tiempo de modelación, paso de tiempo, etc. son necesarias para alimentar e iniciar las modelaciones.

En las simulaciones del Golfo de México, se corrió el abanico de direcciones del Este al Oeste con un intervalo de 22.5 grados, que dan un total de 9 direcciones, en cada una de ellas se simuló 6 intensidades de viento: 63, 90, 108, 126, 144 y 155 Km/h, para cada caso se modelaron 55.5 hrs, buscando así la estabilidad del nivel de marea. En las primeras 18 hrs simuladas, el viento crece gradualmente hasta alcanzar el viento máximo, una vez esto el viento permanece constante hasta alcanzar la estabilidad de la marea.

En el Caribe de México, las direcciones modeladas fueron desde el Sur-Sureste al Noreste, ya que este abanico es generador de los niveles más altos de marea en la zona, el intervalo de las direcciones fue de 22.5 grados, haciendo un total de 6 direcciones cada una de ellas con 6 intensidades de viento: 63, 90, 108, 126, 144 y 155 Km/h, igual que en el Golfo de México, el viento crece gradualmente hasta alcanzar el viento máximo en las primeras 18 hrs simuladas, después de ese tiempo el viento permanece constante buscando la estabilidad del nivel de marea.

En zonas con altos gradientes de profundidad como fue el caso del Caribe, en las primeras pruebas de modelación, se busca un paso de tiempo adecuado que ayude al modelo a no perder precisión en la secuencia del cálculo, pero que éste a su vez, también permita optimizar el tiempo de modelación.

Síntesis:

1. Se cumplieron las metas especificadas del proyecto.
2. El modelo numérico de marea de tormenta MATO con esquema de inundación y secado de celdas funcionó satisfactoriamente para los diversos casos de estudio.
3. Se generaron diversas bases de datos, las cuales se anexan digitalmente en este informe:
 - a) Datos de elevación del terreno.
 - b) Batimetrías y topografías costeras mexicanas digitalizadas, tomadas de información de la Secretaría de Marina y de imágenes de satélite Quickbird y un modelo de elevación digital del terreno.
 - c) Datos de huracanes que impactaron México en ambos litorales.
 - d) Simulaciones numéricas de marea de tormenta asociada a intensidades de viento y direcciones de eventos extremos, las cuales se pueden consultar a través de una página WEB local.

8. Bibliografía

Alcrudo, F., García, P.,(1993) "A High-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the Shallow water Equations", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 16. Pag. 489-505

Blumberg, A.F., Mellor, G.L., (1987) "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean models", Ed N.S. Heaps, American Geophysical Union. Washington D.C. EE.UU.

Bretschneider, C.L. (1990). Tropical Cyclones. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 1, Gulf Publishing Co. USA. pp. 249-370.

Boussinesq, J., (1877). "Essai sur la théorie des eaux courants". *Mém. Prés. Acad. Sci. Paris* (Ser.2). No 23. Pag. 1-680.

Castanedo, S. (2000) Desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional para el estudio de la propagación de ondas largas en estuarios y zonas someras, Tesis doctoral Santander España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria,. 275 pp

Falconer, R.A.,(2004) An introduction to nearly-horizontal flows, *Coastal, Estuarial and Harbour Engineer's Reference Book*, Ed M.B. Abbott y W.A. Price, Chapman & Hall, Londres, 1994. pp 27-36

Holland, G.L. (1980). An analytical model of wind and pressure profiles in hurricanes. *Monthly Weather Review*, Vol. 108, pp. 1212-1218.

Jan O. Backhaus, 2007, Improved Representation of Topographic Effects by a Vertical Adaptive Grid in Vector-Ocean-Model (VOM), Part I: Generation of Adaptive Grids, Elsevier Editorial System(tm) for Ocean Modelling

Jan O. Backhaus, Udo Hübner, Ingo Harms, Improved Representation of Topographic Effects by a Vertical Adaptive Grid in Vector-Ocean-Model (VOM), Part II: Simulations in Unstructured Adaptive Grids, Elsevier Editorial System(tm) for Ocean Modelling

Pérez, D.M., Bolaños, R., Silva, R. (2008). Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. En Imprenta. Fecha de publicación: abril-junio de 2008, Vol. XXIII, No. 2.

Posada, G., Silva, R., Medina, R. (2008), "Modelo numérico tridimensional para transporte de un contaminante conservativo", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*,. Vol. XXIII, núm. 1, II Época, enero-marzo de 2008 pp. 5-19. ISSN-0186-4076

Posada, G., Silva, R., Medina, R. (2008), "Modelo numérico tridimensional para transporte de un contaminante conservativo", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*,. Vol. XXIII, núm. 1, II Época, enero-marzo de 2008 pp. 5-19. ISSN-0186-4076

Rogers, B., (2001), "Refined localised modelling of coastal flow features using adaptive quadtrees grids", *Tesis Doctoral*, Universidad de Oxford. pp. 150

Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G., Diaz, G. (2002). Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast. *Proc. 28th International Conference on Coastal Engineering*. World Scientific. Singapore.

Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Serie Docencia 49. Instituto de Ingeniería, UNAM. México., 179 pag.