



**PRIMER REPORTE DE AVANCE DEL PROYECTO DE  
FONDOS MIXTOS CNA-CONACYT “CNA-2006-01-48639”,  
TITULADO:**

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

**RESPONSABLE: SAÚL MIRANDA ALONSO**

**12 de mayo del 2008**

## Índice

1.- Resumen.....	4
2.- Introducción.....	5
3.- Antecedentes .....	5
4.- Metas para la primera parte del proyecto como especificadas en la propuesta a CONACYT.....	7
5. - Metodologías.....	8
6.- Resultados .....	10
6.1.- Inundaciones .....	10
6.2.- Datos de caudales de ríos del banco de datos Bandas.....	10
6.3.- Batimetría mejorada .....	11
6.4.- Adaptación del modelo numérico de Marea de Tormenta para incluir inundaciones.....	11
7.- Adquisiciones.....	12
8.- Estancia a participante en el extranjero .....	12
9.- Conclusiones.....	12
10.- Bibliografía .....	13
ANEXO A .....	14
Marea de Tormenta Inducida por Nortes en los Estados de Tabasco y Campeche, México.....	14
Introducción.....	14
Objetivos .....	15
Modelo hidrodinámico .....	15
Malla Jerárquica.....	16
Zona de estudio .....	16
Vientos modelados.....	17
Conclusiones.....	18
Referencias Bibliográficas.....	18
ANEXO B .....	19
Reporte de resultados de la comisión realizada por el Dr. Saúl Miranda Alonso, a la Universidad de Hamburgo, dentro del proyecto de CNA-CONACYT:.....	19
ANEXO C .....	33
Informe de actividades .....	33
Julio 2007- febrero 2008 .....	33
Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos .....	33
Instituto de Ingeniería.....	33
Universidad Nacional Autónoma de México .....	33
Introducción.....	33
Actividades realizadas.....	33
Adquisición de imágenes de satélite.....	33
Desarrollo del modelo numérico para la obtención de la marea de tormenta....	36
Descripción .....	36
Modelo numérico Bidimensional .....	37
Sistema de mallado.....	53
Validación de resultados para el modelo bidimensional.....	65
Creación de mapas de clima marítimo para la Vertiente Atlántica.....	69

Introducción.....	69
Metodología .....	69
Aplicación.....	70
Productos generados .....	75
Artículos.....	75
Atlas.....	75
ANEXO D .....	76
Introducción.....	76
Base de datos de huracanes.....	76
Modelo utilizado.....	76
Componentes de la base de datos .....	78
Bibliografía.....	80
ANEXO E .....	81
Elaboración de un SIG y de una página WEB.....	81
ANEXO F.....	90
Administración.....	90
1.- Apoyo académico a un Posdoctorado .....	90
2.- Lista de Participantes .....	90
3.- SIG y página WEB.....	91
4.- Convenios firmados y anexos técnicos.....	91
1.- UNAM-Instituto de Ingeniería y el IMTA.....	91
"Anexo técnico I" .....	91
UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO	91
Objetivo General .....	91
Objetivos específicos .....	91
Cronograma de actividades .....	91
2.- Convenio modificadorio al convenio de colaboración entre Inng-UNAM y el IMTA.....	92
"Anexo técnico II" .....	92
UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO	92
Procesamiento de información batimétrica y topográfica. ....	93
Objetivo General .....	93
Objetivos específicos .....	93
Cronograma de Actividades Instituto de Ingeniería, UNAM .....	93
Primer año .....	93
Segundo año .....	93
3.- Convenio específico de colaboración que celebran por una parte la Universidad Autónoma de Campeche y el IMTA.....	93
"Anexo técnico III" .....	93
PROYECTO "UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO". ....	93
Objetivo General .....	94
Objetivos específicos .....	94
Cronograma de actividades .....	94

## 1.- Resumen

El propósito general de este proyecto es identificar y caracterizar las zonas costeras de México en peligro de inundación por marea de tormenta. Determinar un conjunto de envolventes de trayectorias ciclónicas históricas y sintéticas producidas con modelación numérica, para implementar y calibrar un sistema que reproduzca escenarios probables de inundación costera. Determinar periodos de retorno versus cota de inundación, elaborar el análisis de vulnerabilidad/peligrosidad y análisis extremal para las zonas identificadas. Se generarán líneas de inundación a gran escala para todo el litoral mexicano, asociadas a diferentes periodos de retorno. Se obtendrán resultados más detallados para zonas costeras con asentamientos mayores a 3000 habitantes. Los modelos que se utilizarán (HURAC y MATO), ya tienen más de cinco años en elaboración por el instituto de ingeniería de la UNAM y han sido validados en múltiples ocasiones en el litoral mexicano. 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 con resultados equivalentes del modelo SLOSH que actualmente se utiliza operacionalmente en EUA para la prevención de inundaciones, previa negociación del Servicio Meteorológico Nacional con su equivalente en EUA para el aprendizaje y uso del modelo. Un modelo de atmósfera a mesoescala inicializado con los pronósticos de los modelos de EUA, dará más detalle en los vientos del ciclón tropical. Se producirá un sistema de información geográfica (SIG) diseñado para los tomadores de decisiones en que se muestren las zonas en peligro de inundación en función del pronóstico de la trayectoria e intensidad y ángulo de incidencia de un determinado huracán. El SIG también mostrará las principales vías de desalojo, las poblaciones y los puntos sensibles como las represas y las instalaciones industriales y económicas situadas en la zona de riesgo. El SIG mostrará los escenarios como resultado de modelaciones numéricas previas y síntesis de la información relevante para cada zona y estará diseñado para auxiliar en la toma de decisiones educadas de evacuación de la población. La modelación numérica se alimentará con datos de un retro-análisis desde 1949 a 2006 de todos los ciclones tropicales que han afectado la costa mexicana y ésta información se complementará con el estudio de posibles afectaciones por meteoros generados de forma sintética. La batimetría de las zonas costeras se obtendrá de las cartas de la Secretaría de la Marina y la topografía costera de INEGI. Las trayectorias históricas de los ciclones serán las de NOAA. El grupo de trabajo se conformará con personal del IMTA que será responsable del proyecto e investigadores del Instituto de Ingeniería UNAM, EPOMEX de la universidad Autónoma de Campeche, y el CINVESTAV - Mérida.

## **2.- Introducción**

Ciclón tropical es el término científico que se utiliza para definir una circulación meteorológica intensa cerrada que se propaga sobre aguas tropicales. Éste sistema de gran escala y baja presión ocurre en muchas partes del mundo y su nombre varía según la región geográfica en el cual se desarrolla: en el Atlántico y en el nor-este del Pacífico se conocen como ciclones tropicales, en el nor-oeste del Pacífico como tifones y en el Pacífico Sur, así como en el Océano Indico, son conocidos simplemente como ciclones. El 75 % de los ciclones tropicales se desarrollan en el Hemisferio Norte, donde éstos viajan alejándose del Ecuador con una rotación en sentido antihorario, (Silva et al. 2001), en tanto que en el Hemisferio Sur, en sentido horario. 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. En muy diversas investigaciones sobre los daños que han ocasionado los ciclones tropicales sobre el Continente Americano, se tienen estadísticas que muestran que gracias 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 estas zonas. 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 (económicas y humanas) es la inundación de zonas costeras por marea de tormenta.

## **3.- Antecedentes**

La marea de tormenta es una onda de gravedad causada por el agua impulsada sobre la tierra, principalmente por la fuerza de los vientos de la tormenta hacia la costa, y de manera secundaria por la reducción de la presión barométrica a nivel del mar entre el ojo del ciclón y la región externa. 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 mar profundo, lejos de las costas, 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. 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. Actualmente existe una diversidad de modelos numéricos llamados de marea de tormenta;

éstos permiten estimar las afectaciones que puede sufrir una zona geográfica potencialmente vulnerable ante la ocurrencia de ciclones tropicales. 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. Los estudios más relevantes reportados en la literatura son los de Jelesnianski (1967, 1982), quien presentó los fundamentos analíticos del modelo Slosh, implementado actualmente en el centro nacional de ciclones tropicales (National Hurricane Center) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de los Estados Unidos. Se cuentan también los trabajos de Hubbert et al. (1999), quienes presentaron un modelo hidrodinámico de alta resolución con los mismos fines que el modelo Slosh. El modelo de marea de tormenta que se implementará 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). Uno de los datos más importantes para la buena consecución de este modelo es la evaluación correcta del radio ciclostrofico (distancia que existe entre el centro del ojo del huracán y la zona donde se genera el máximo viento ciclónico), para lo cual se utiliza la relación propuesta por Silva et al. (2000), que ha demostrado excelente precisión para ambas vertientes del litoral mexicano. 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

implementará como parte del presente trabajo de investigación, 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. En el apartado de referencias bibliográficas se presenta un listado en el cual se puede observar la experiencia probada del grupo de trabajo en temas relacionados con el objeto del proyecto en cuestión. El modelo Slosh se utiliza actualmente en forma operativa en los EUA y su desempeño se le califica como bueno en la predicción de mareas de tormenta. Su implementación en las costas mexicanas nos servirá como referencia para evaluar el desempeño de los modelos desarrollados en México y adaptados a las características específicas de nuestras costas. Una opción para modelar los vientos de huracán, se probará usando al modelo de mesoescala mm5. Ésta técnica es un posible complemento o mejora al desempeño de los modelos a desarrollar/implementar. El modelo mm5 se acoplará al modelo de circulación marina VOM de la universidad de Hamburgo y se evaluará su capacidad de simulación comparado contra los otros modelos y mediciones reales históricas. La recopilación y escrutinio de datos históricos de trayectorias de huracanes y de las inundaciones que provocaron, nos permitirán reproducir escenarios de casos reales de marea de tormenta y de la magnitud de las inundaciones que produjeron. Con estos resultados se podrán evaluar/calibrar los modelos numéricos.

#### **4.- Metas para la primera parte del proyecto como especificadas en la propuesta a CONACYT**

- 4.1.- Re-acondicionamiento del modelo numérico de marea de tormenta MATO con esquema de inundación y secado de celdas para que se pueda integrar en el SIG.
- 4.2.- Generación de dos bases de datos para efecto de estudios de caso: la primera que incluya las trayectorias de huracanes que afectan a la costa mexicana basada tanto en eventos históricos como sintéticos (elaborados por computadora en condiciones posibles); la segunda tendrá información de inundaciones registradas en nuestras costas y daños causados a la población y sus bienes.
- 4.3.- Inicio de la captura y digitalización de la batimetría y topografía de las costas de México a partir de las bases de datos de la Secretaría de Marina y de imágenes de satélite Quickbird y un modelo digital del terreno.
- 4.4.- Adquisición de computadora con procesadores en paralelo.
- 4.5.- Desarrollo de la arquitectura del sistema de información geográfico

## 5. - Metodologías

Como se mencionó antes, la topografía y batimetría de las zonas a analizar son importantes datos de entrada para al modelo de marea de tormenta. Si éstos tienen una resolución pobre, se tendrán resultados matemáticamente correctos pero inadecuados para detectar las zonas potencialmente inundables y, por ende, las poblaciones que eventualmente deben ser evacuadas. De ahí la necesidad de obtener batimetría y topografía de buena calidad y alta resolución. Estos datos se obtendrán 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 a considerar 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 hidrográficas 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). Incorporación de la cartografía de análisis parciales y síntesis, en formato html, para acceder en cualquier computadora sin necesidad de conectarse a un servidor. Selección de periodos de retorno de 5 a 500 años para huracanes para la estimación sintética de los campos de presión, viento y oleaje en aguas profundas, se utilizará la base de datos (1949-2005) que ha recopilado el Instituto de Ingeniería de la UNAM a partir de los reportes meteorológicos publicados por la NOAA (<http://www.nhc.noaa.gov>), ésta base de datos contiene información de los ciclones que han ocurrido tanto en el Atlántico

como en el Pacífico. Dicha base de datos incluye; fecha (hora, día, mes, año), posición geográfica del centro del huracán (latitud, longitud), presión atmosférica superficial (mb), máximo viento sostenido (promedios realizados en un minuto) a diez metros sobre la superficie media del mar, velocidad de desplazamiento (km/h), dirección de traslación y radio ciclostrofico para cada uno de los avisos reportados por la NOAA. A partir de la información anterior se ejecutará el modelo paramétrico de ciclones desarrollado por Silva et al. (2002). este modelo a su vez está basado en los trabajos de Sánchez et al. (1998) y Silva et al. (2000) y son una adecuación de los modelos Hydromet-Rankin Vortex de Holland (Holland, 1980) y Bretchsneider (1990). Con dicho modelo se obtienen los campos de presión, viento y oleaje que son necesarios para realizar el análisis extremal aplicando la distribución de Weibull, con dicho análisis se obtendrán los huracanes con periodo de retorno de 10 a 500 años para cada estado costero de la República Mexicana. Durante las últimas décadas, una enorme cantidad de trabajos en modelación matemática han sido desarrollados, como una consecuencia del desarrollo de potentes computadoras, éstos han estado dirigidos al estudio de la dinámica de fenómenos dentro de la hidráulica. Uno de los fenómenos que ha cobrado mucha importancia es el de la propagación de ondas, tanto en zonas costeras como en ríos. El progreso de los modelos de propagación de ondas están directamente ligados a: entender la dinámica del flujo, formulación apropiada de las leyes matemáticas, desarrollo de técnicas numéricas para resolverlas y la validación de los resultados de los modelos contra datos experimentales o datos físicos reales. Las leyes fundamentales que gobiernan el fenómeno son las ecuaciones de Navier-Stokes, sin embargo su solución es casi imposible dada su alta no-linearidad. En ocasiones se pueden realizar simplificaciones que conducen a ecuaciones más simples, que permiten representar el fenómeno sin castigar calidad en los resultados. Para el caso de ondas largas se plantean las ecuaciones para aguas poco profundas, obtenidas mediante una integración de las ecuaciones de Navier-Stokes en la profundidad, mismas, que son integradas numéricamente en el modelo de marea de tormenta mediante un método en volumen finito. El modelo de marea de tormenta obtiene las sobrelevaciones producidas por un huracán en todo el dominio de cálculo, mismas que son propagadas hacia las costas donde, en base a la complejidad geométrica terrestre (características de la zona costera, canales, lagunas costeras y relieve), se determinan las áreas inundables. Estas áreas a su vez alimentan al sistema de información geográfico que servirá como herramienta para la toma de decisiones. El modelo Slosh se implementará a la zona costera y servirá como una fuente alterna de información para complementar y evaluar el modelo Mato desarrollado para las características específicas de las zonas costeras mexicanas. Para la modelación del viento por huracán y circulación costera se implementará el modelo meteorológico de mesoescala mm5 para reproducir los vientos de huracán, utilizando datos históricos de trayectoria y características de los huracanes y condiciones generales de la atmósfera producidos por los modelos de escala hemisférica y global también históricos y publicados por la NOAA. el modelo mm5 se acoplará al modelo oceanográfico VOM para dar campos generales de circulación producida por vientos de huracán. Los datos de viento y circulación costera modelados por el mm5 y VOM se traducirán a los formatos

requeridos por los modelos de marea de tormenta. Se implementará un sistema de cómputo en paralelo para calibrar y evaluar al sistema completo y simular casos reales en tiempos aceptables. El modelo mm5 se adaptará para simular vientos de huracán.

## **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 operativamente 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.

## **7.- Adquisiciones**

Los modelos numéricos se probaron satisfactoriamente en equipos de cómputo existente en las instituciones participantes, Anexo A y Anexo B.

Se compró una computadora con dos procesadores para trabajo de cómputo en paralelo. El modelo MM5 ya se instaló en paralelo en esta computadora.

## **8.- Estancia a participante en el extranjero**

Se realizó la estancia de un investigador en la Universidad de Hamburgo para aprender el uso de un modelo de circulación costera.

Taller sobre el manejo del modelo oceanográfico VOM.  
Prof. Jan Backhaus Universidad de Hamburgo.  
01-28 de octubre 2007.  
Anexo B.

## **9.- Conclusiones**

Las metas como especificadas para esta primer parte del proyecto han sido cumplidas.

El modelo numérico de marea de tormenta MATO con esquema de inundación y secado de celdas ya fue probado para un caso de estudio, Anexo A.  
Las dos bases de datos para efecto de estudios de caso ya fueron generadas y se encuentran en el CD que acompaña al informe: la primer base de datos incluye las trayectorias de huracanes que afectan a la costa mexicana basada tanto en eventos históricos como sintéticos (elaborados por computadora en escenarios posibles); la segunda base de datos tiene información de inundaciones registradas en nuestras costas y daños causados a la población y sus bienes.

La captura y digitalización de la batimetría y topografía de las costas de México a partir de las bases de datos de la Secretaría de Marina y de imágenes de satélite Quickbird y un modelo de elevación digital del terreno no tan sólo se inició sino que se tiene ya muy avanzada.

Se adquirió una computadora moderna con dos procesadores duales en paralelo en la cual ya se instaló el modelo MM5.

Se diseñó la estructura del Sistema de Información Geográfica y se añade el diseño de una página WEB para mostrar los resultados futuros, Anexo E.

En la segunda parte de este proyecto se complementarán las bases de datos, y se acoplarán las diferentes herramientas implementadas por los diferentes grupos participantes. Se simularán diferentes escenarios con los diferentes modelos para obtener el sistema que mejor simule las inundaciones costeras en los casos de estudio mejor documentados con los que se cuenta.

## 10.- Bibliografía

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

**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

**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 quadtree 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.

## ANEXO A

### Marea de Tormenta Inducida por Nortes en los Estados de Tabasco y Campeche, México

Gregorio Posada Vanegas<sup>1</sup>, Rodolfo Silva Casarín<sup>2</sup>,  
Saúl Alonso Miranda<sup>3</sup>, Sébastien de BRYE<sup>4</sup>, Gerardo Palacio Aponte<sup>5</sup>

<sup>1,2,4</sup> Coordinación de Hidráulica, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Circuito Escolar s/n, Edificio 5, Cub. 406, Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, México D.F. México.

Tel. +52(55)56233600 ext. 8633, Fax: +52(55)56162798

<sup>3</sup> Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Mor.

Tel: +52 (777) 329 3600 ext. 525

<sup>5</sup> Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), Av. Agustín Melgar s/n, Col Buenavista, C.P.24030 Campeche, México Tel: +52 (981) 811 9800 ext 62300

[gposadav@iingen.unam.mx](mailto:gposadav@iingen.unam.mx), [rsilvac@iingen.unam.mx](mailto:rsilvac@iingen.unam.mx), [smiranda@tlaloc.imta.mx](mailto:smiranda@tlaloc.imta.mx),  
[sdebrye@iingen.unam.mx](mailto:sdebrye@iingen.unam.mx), [gpalaciomx@gmail.com](mailto:gpalaciomx@gmail.com)

### Introducción

Durante el mes de noviembre del 2007 se presentó una gran inundación en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, debida entre otros factores, a una temporada invernal fuerte y a la necesidad de liberar controladamente el agua almacenada en la presa hidroeléctrica que se encuentra aguas arriba de esta ciudad. Villahermosa se encuentra ubicada en las márgenes del río Grijalva, el cual desemboca en el mar 50 km. más adelante. Otro factor que se consideró como posible responsable de dicha inundación fue el estacionamiento de un norte días previos a esta inundación en el Golfo de México, el cual debido a la dirección de los vientos en dirección norte-sur, pudo haber modificado considerablemente el nivel medio del mar, generando un tapón hidráulico en la desembocadura del Grijalva, ocasionando que el agua que transitaba por el cauce del río se hubiera remansado y por lo tanto aumentado el nivel de la inundación.

En este artículo se presenta la modelación hidrodinámica de nortes, con intensidad de 10 a 55 nudos, que actúan en las costas de los estados de Tabasco y Campeche, para obtener las curvas de elevación de la superficie libre versus tiempo de acción del meteoro en la desembocadura del río Grijalva y así estimar la posible influencia de este evento en la inundación de Villahermosa. Esta modelación se realiza con un programa de cómputo codificado en FORTRAN. Este programa resuelve las ecuaciones de aguas someras bajo un esquema de volumen finito y trabaja sobre una malla jerárquica de tipo Quadtree.

## Objetivos

Dentro de los objetivos de este artículo están (1) presentar las ecuaciones de gobierno que resuelve el modelo numérico y su discretización, (2) describir el sistema de malla jerárquica que se utiliza para resolver estas ecuaciones y (3) presentar el comportamiento de la superficie libre del mar y las velocidades medias producidas por un viento constante en dirección norte-sur que actúa permanentemente durante un periodo de 4 días en las costas de Tabasco y Campeche.

## Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico resuelve bajo un esquema de volumen finito las ecuaciones de ondas largas, tal como lo describe Posada (2008). A continuación se presentan brevemente las ecuaciones utilizadas.

### Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad [1]$$

Donde  $H = h + \eta$

$\eta$  = sobrelevación en la columna de agua,  $h$  = profundidad del fondo con respecto al N.M.M,  $U$  = Velocidad media en la dirección X,  $V$  = Velocidad media en la dirección Y

Ecuación de cantidad de movimiento en dirección X:

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

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,  $\varepsilon_h$  = coeficiente de viscosidad de remolino,  $\tau_{xz(\eta)}$  = esfuerzo debido al viento en la dirección X,  $\tau_{xz(-h)}$  = esfuerzo debido al fondo en la dirección X

Ecuación de cantidad de movimiento en dirección Y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u'v' dz + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz = \\ -fUH - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) + H \varepsilon_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \\ 2H \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad [3]$$

### **Malla Jerárquica**

Las ecuaciones de gobierno se resuelven sobre una malla jerárquica en dos dimensiones que es creada alrededor de un conjunto de puntos semillas. Entre las ventajas que se tienen al utilizar este mallado se encuentran: la generación de la malla es automática sin importar la aparente complejidad del dominio. Las variables estudiadas son almacenadas de una manera jerárquica que 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, Rogers (2001).

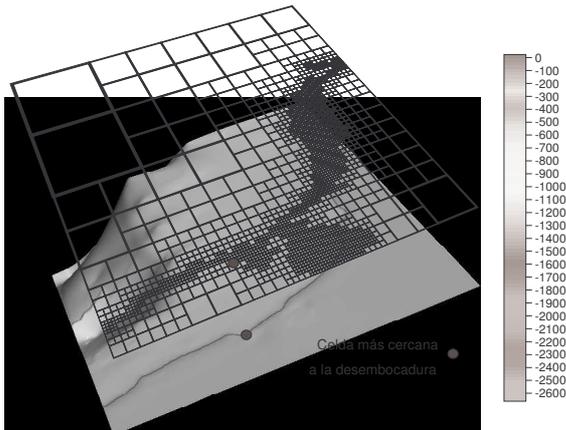
Estas mallas se conocen con el nombre de "jerárquicas" ya que la información de cada celda se guarda de manera similar a la estructura de un árbol genealógico, en donde cada celda tiene hermanas, además de que proviene de una celda madre y ésta a su vez también proviene de otra celda madre. La construcción de la malla se describe en Posada (2008).

### **Zona de estudio**

El área sobre la cual se realizaron las modelaciones hidrodinámicas está entre las coordenadas 503.000 y 815.500 este y 1.199.000 y 2.543.000 Norte, de la zona UTM 14. La profundidad máxima en esta zona es de 2600 m, las dimensiones son de 315 por 547 Km. En la tabla 1 se indican las características de la malla construida, la cual se muestra en la Figura 1.

Máxima resolución	Entre las cotas 10.0 m y -19.0 m (cotas negativas para la tierra)
Celda con mayor definición	2480.0 m por 4307.0 m
Celda con menor definición	39695.0 m por 68923.0 m
Celdas base inicial	16384
Cantidad final de celdas	2344

**Tabla 1.- Características de la malla jerárquica**



**Figura 1.-** Malla de cálculo y batimetría

### Vientos modelados

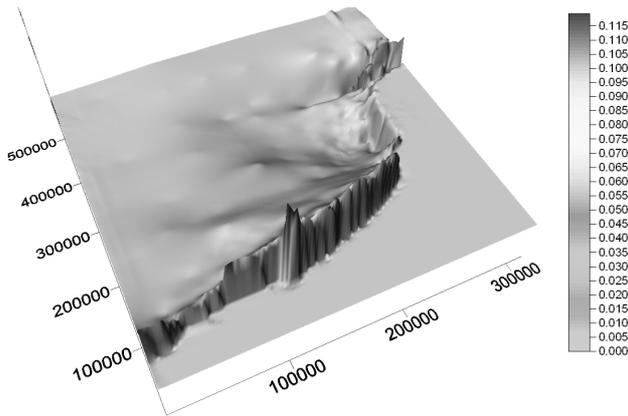
La dirección del viento es norte a sur, la modelación se inicio con un esfuerzo debido al viento igual a cero y se llevó a su valor máximo por medio de una función cúbica (Tabla 2). Una vez que el viento llegó a su máximo esfuerzo se dejó la modelación el tiempo suficiente para que se establezcan los resultados, lo cual se obtuvo como máximo a las 40 h de modelación.

No	Nudos	Km/h	Esfuerzo
1	10	18.52	0.086
2	15	27.78	0.194
3	20	37.04	0.344
4	35	64.82	1.054
5	40	74.08	1.376
6	55	101.86	2.602

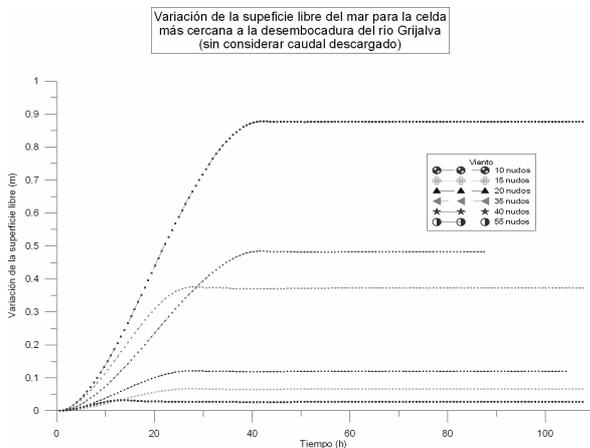
**Tabla 2.-** Características de los vientos modelados

En la Figura 2 se presenta la superficie libre estable para la zona de estudio cuando se considera un viento de 20 nudos: se observa que el valor máximo se obtiene cerca de la desembocadura del río Grijalva.

La Figura 3 presenta la variación de la superficie libre como función del tiempo para la celda más cercana a la desembocadura del río Grijalva, en dicha celda se presentan los mayores niveles del nivel medio de mar. Para 55 nudos la superficie libre se estabiliza en 0.92 m.



**Figura 2.-** Superficie libre del agua estable para 20 nudos



**Figura 3.-** Variación de la superficie libre para la desembocadura

## Conclusiones

Para cada norte modelado, las máximas sobreelevaciones de la superficie libre se presentan en la desembocadura del río Grijalva. Al investigar en los registros de vientos medidos (base de datos NCEP/NCAR), el norte que se ubicó a principios de noviembre en el Golfo de México fue cercano a los 15 nudos, por lo cual la máxima variación del mar es de 8.0 cm, según la modelación esto es insuficiente para crear un tapón hidráulico que permitiera que el río Grijalva se remansara. Por otro lado, es importante mencionar que estos resultados pueden ser de suma utilidad para la planeación de infraestructura.

## Referencias Bibliográficas

**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 quadtree grids", *Tesis Doctoral*, Universidad de Oxford. pp. 150.

## **ANEXO B**

**Reporte de resultados de la comisión realizada por el Dr. Saúl Miranda Alonso, a la Universidad de Hamburgo, dentro del proyecto de CNA-CONACYT:**

### **'UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO'**

Ésta comisión se llevó a cabo para aprender el uso de un modelo oceanográfico de nueva generación. Este modelo se implementará en las costas mexicanas para la determinación de áreas en peligro de inundación por marea de tormenta en casos de huracán, ya sea en forma directa o para producir valores a la frontera para un modelo paramétrico de mayor resolución elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM.

El modelo llamado Vector Ocean Model (VOM) utiliza las ecuaciones de la hidrodinámica completas, en un nuevo sistema de mallas que aumenta la densidad de nodos en el espacio según el proceso físico que se desea resolver. Así por ejemplo, si se desea estudiar la interfase océano-atmósfera, el mallado es más denso en la superficie del océano. Si se desea poner énfasis en los procesos de mezcla por fricción o en transporte de sedimentos en las costas de un cuerpo de agua marina, la cantidad de nodos establecida por el usuario será mayor en la zona costera, aguas someras o plataforma marina.

El modelo no está diseñado para lagunas costeras o cuerpos pequeños de agua donde imperan otro conjunto de ecuaciones dinámicas.

Información detallada del sistema de mallas adaptables se encuentra en Backhaus 2007(a), aplicaciones del modelo en Backhaus 2007(b).

El modelo VOM se implementó al Canal de Yucatán y al Golfo de México y se presentan los resultados en las siguientes secciones.

El modelo VOM esta escrito en FORTRAN y se ha probado en diferentes sistemas computacionales operativos, LINUX, Super Computadora Vectorial, Windows. En el caso actual se utilizó Windows y una computadora personal del IMTA.

Como primer ejemplo se computó un ejemplo para el Canal de Yucatán, con forzamiento por viento continuo de 10 km/h del Este durante tres meses, utilizando una batimetría mejorada, incluso con mediciones propias, que proporcionó el IING-UNAM.

En un caso más completo, se implementó el modelo para el Golfo de México utilizando la batimetría TOPO2 y un viento constante de 10 km/h del oeste y dejando al modelo estabilizarse durante un año. En una lap top del IMTA tardó nueve horas.

Los resultados del ejemplo para el Golfo de México se presentan a continuación, empezando por una descripción de la batimetría utilizada en el modelo, figura 1

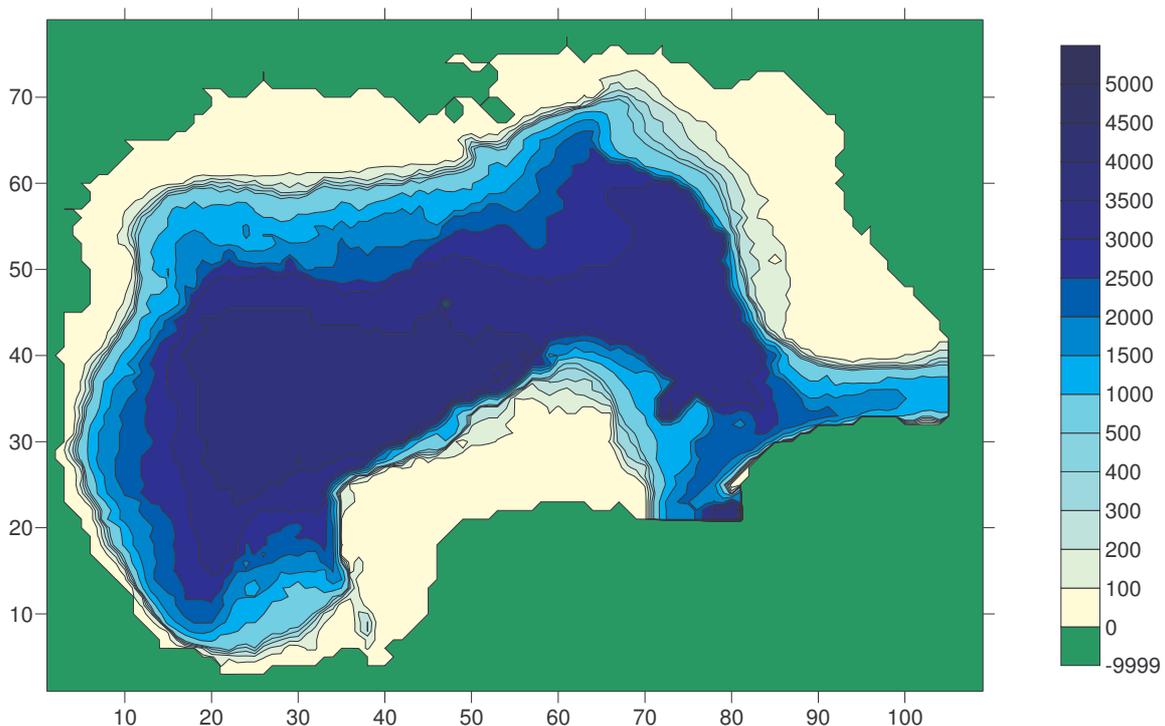


Figura 1.- Batimetría del Golfo de México

En las siguientes figuras se muestran diferentes cortes de este-oeste y norte-sur que muestran los nodos con su peculiar configuración cerca de las zonas de interés oceanográfico (superficie, fondo, costas, picos abruptos en el fondo) Figuras 2 - 6.

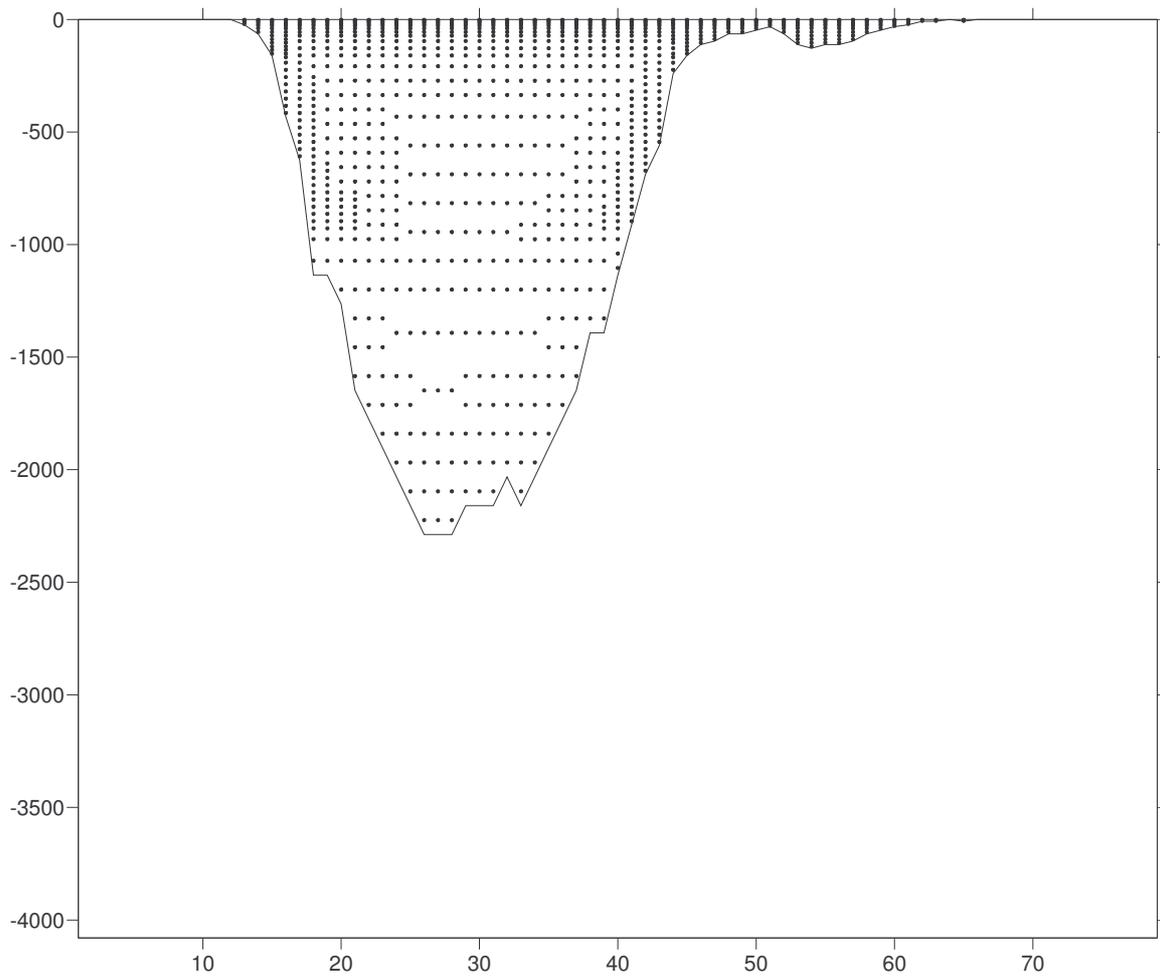


Figura 2.- Grim010.dat y grim010.bln. Corte E-W referenciado a la Fig 1 con topografía y mallado generado automáticamente por el modelo.

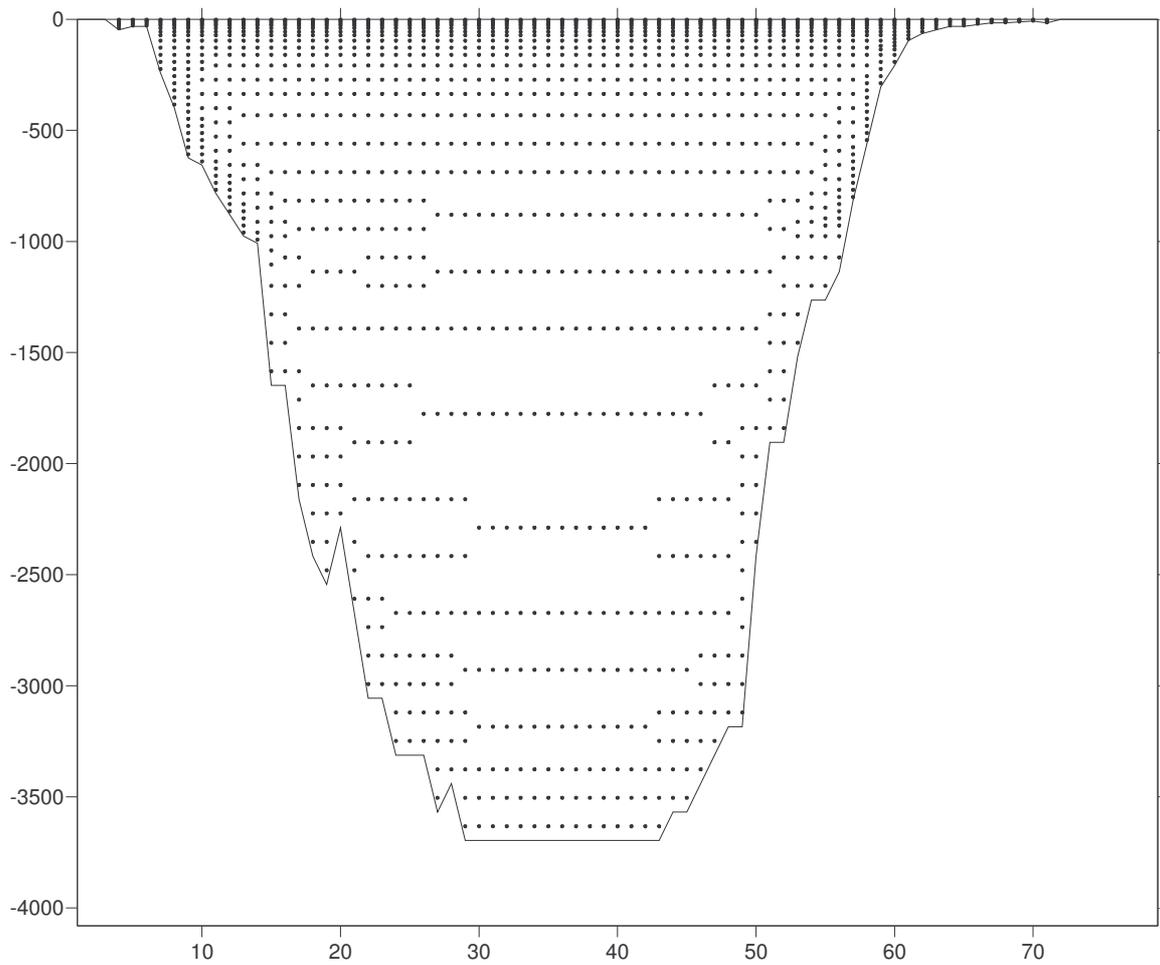


Figura 3.- Grim030.dat y grim030.blm

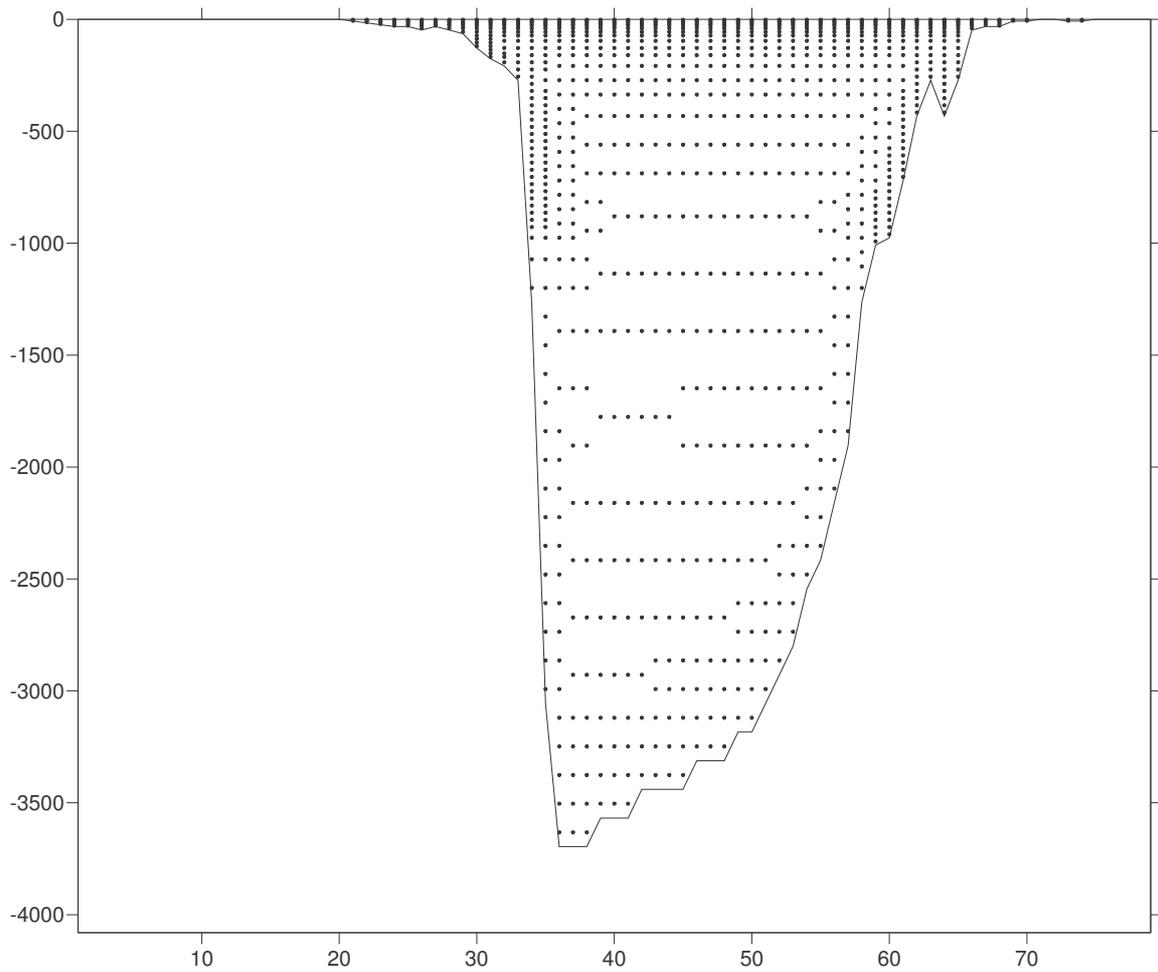


Figura 4.- Grim050.dat y grim050.blm

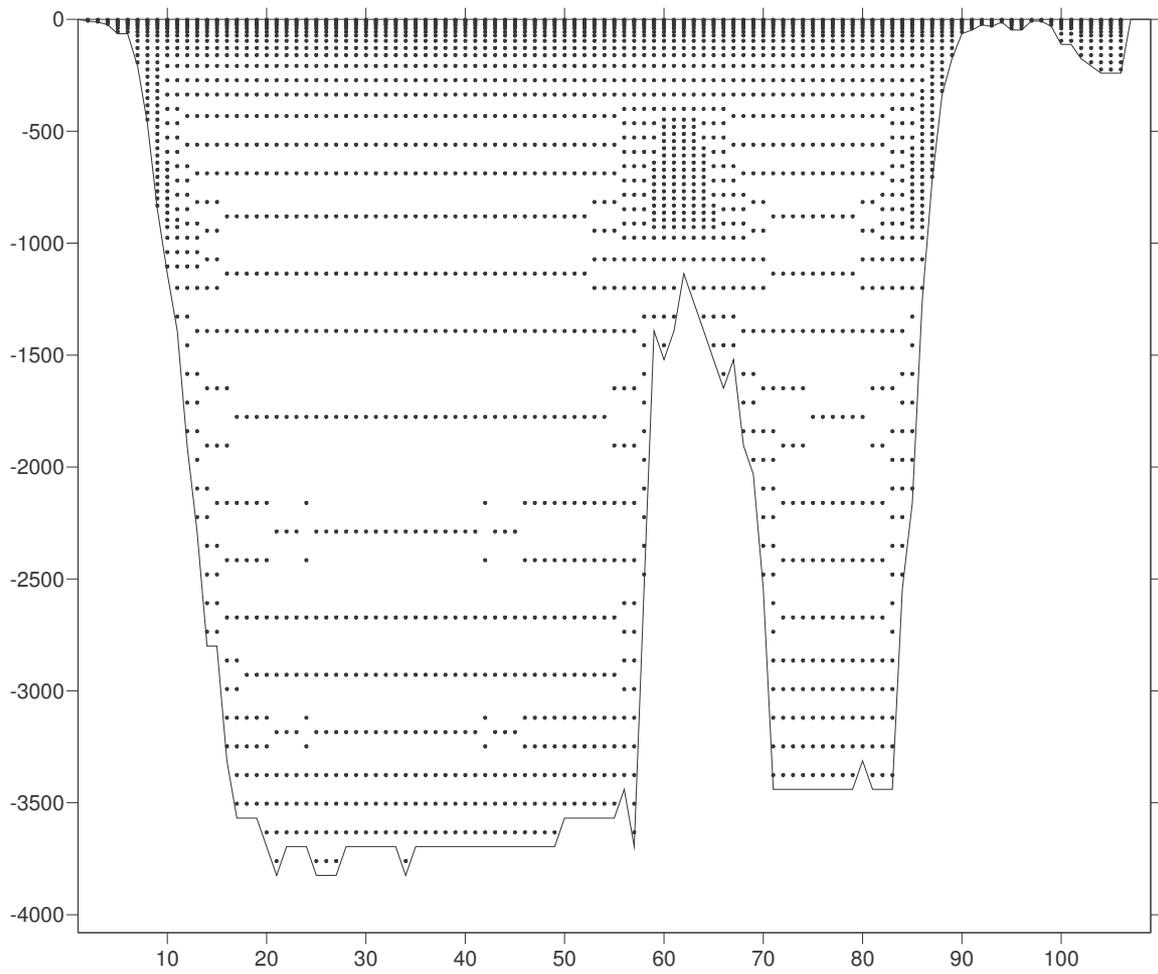


Figura 5.- Griz40.dat

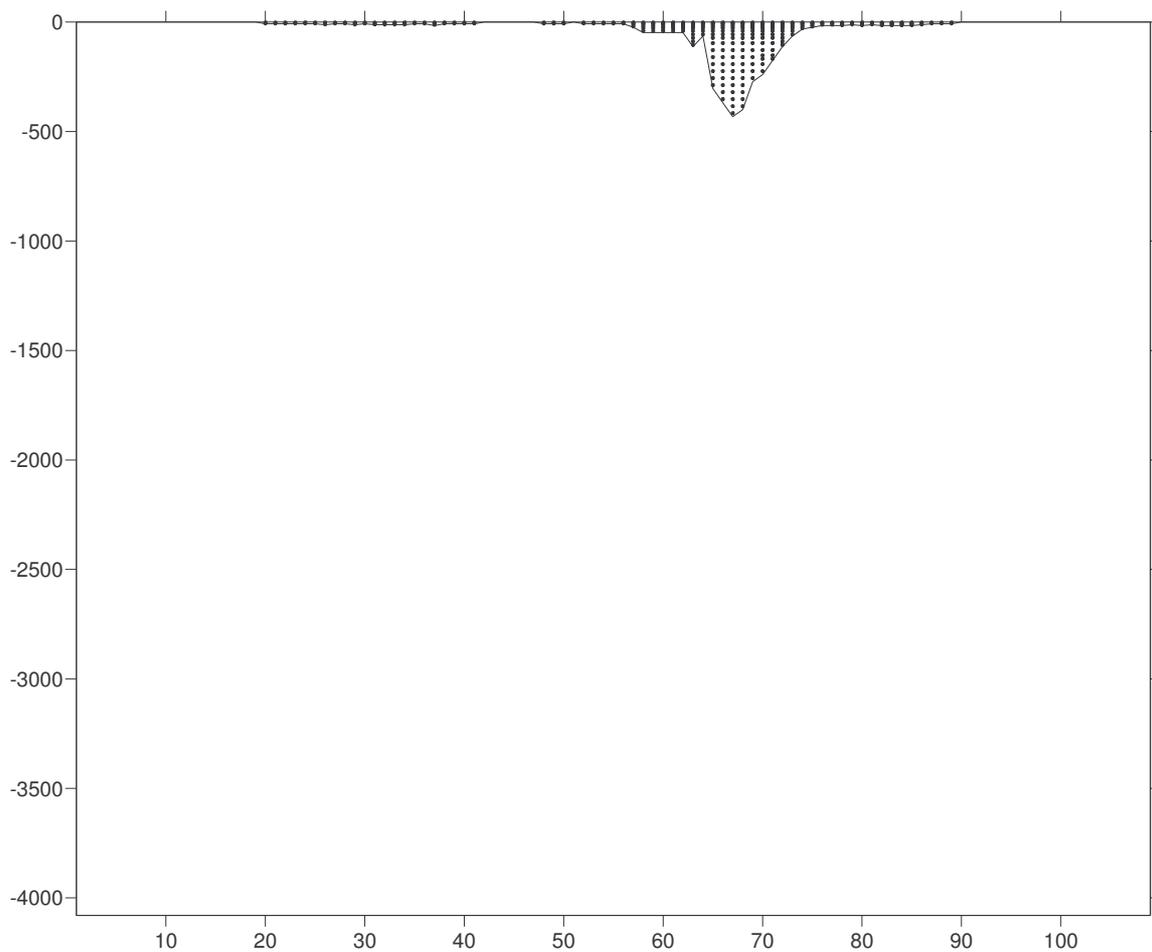


Figura 6.- Griz070

En la figura 7 tenemos una gráfica de la elevación o amplitud en el Golfo de México con elevación de un metro en el norte y disminución de medio metro en el sur.

En la figura 8 se ven las velocidades en la superficie con disminución cerca de la costa por efectos de fricción.

En la figura 9 se muestran las velocidades a la profundidad de 400 m, donde aparecen giros ciclónicos y anticiclónicos.

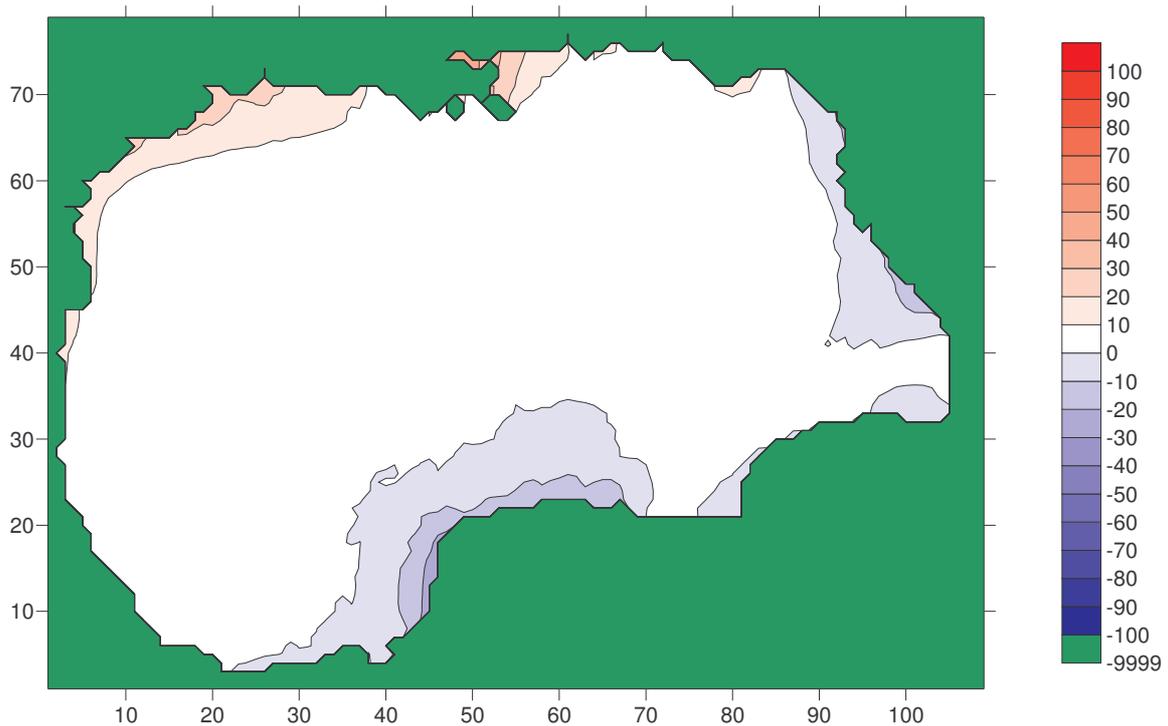


Figura 7.- Amplitud en cm después de un año, viento del E 10 km/h

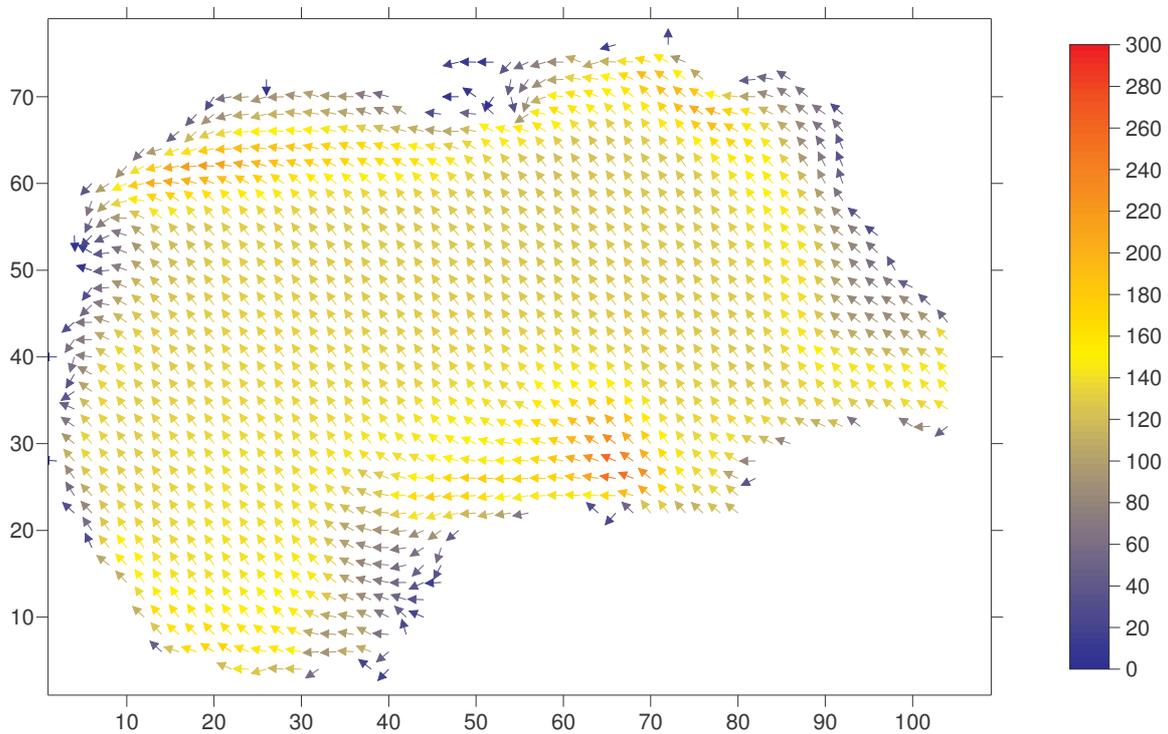


Figura 8.- Velocidad superficie, cm/s

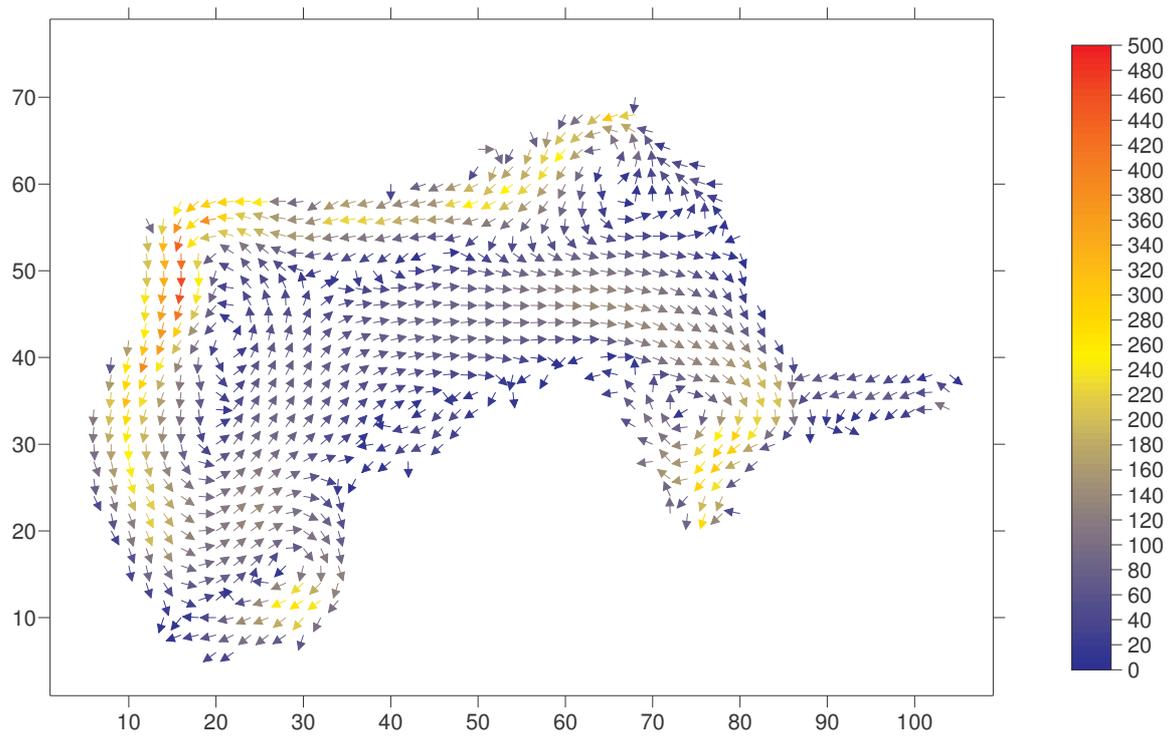


Figura 9.- Velocidad de la corriente marina a 400 m de profundidad

### CANAL DE YUCATÁN

Para modelar el Canal de Yucatán se asumió una cuenca cerrada, esto por no tener datos a la frontera.

En la figura 10 se muestra el patrón de velocidades para un periodo de estabilización del modelo de tres meses con un viento constante de 10 km/h del Este.

En la figura 11 se muestran las velocidades a 500 m de profundidad.

La figura 12, muestra superpuestas las elevaciones de la superficie y las velocidades superficiales.

De la figura 13 a la 16 se muestran diferentes cortes en la estructura de las mallas.

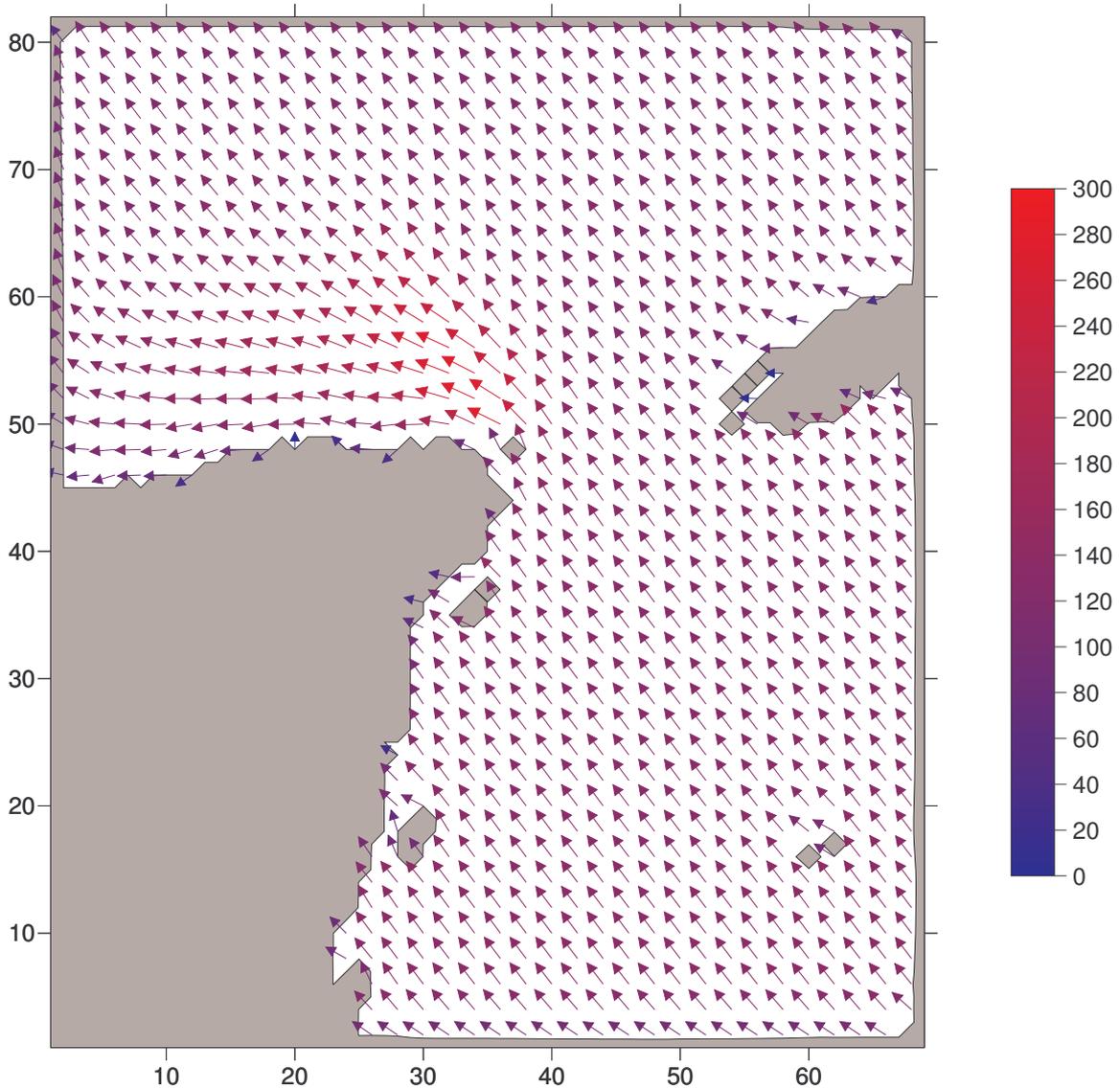


Figura 10.- Velocidades en la superficie con un viento constante del este de 10 km/h

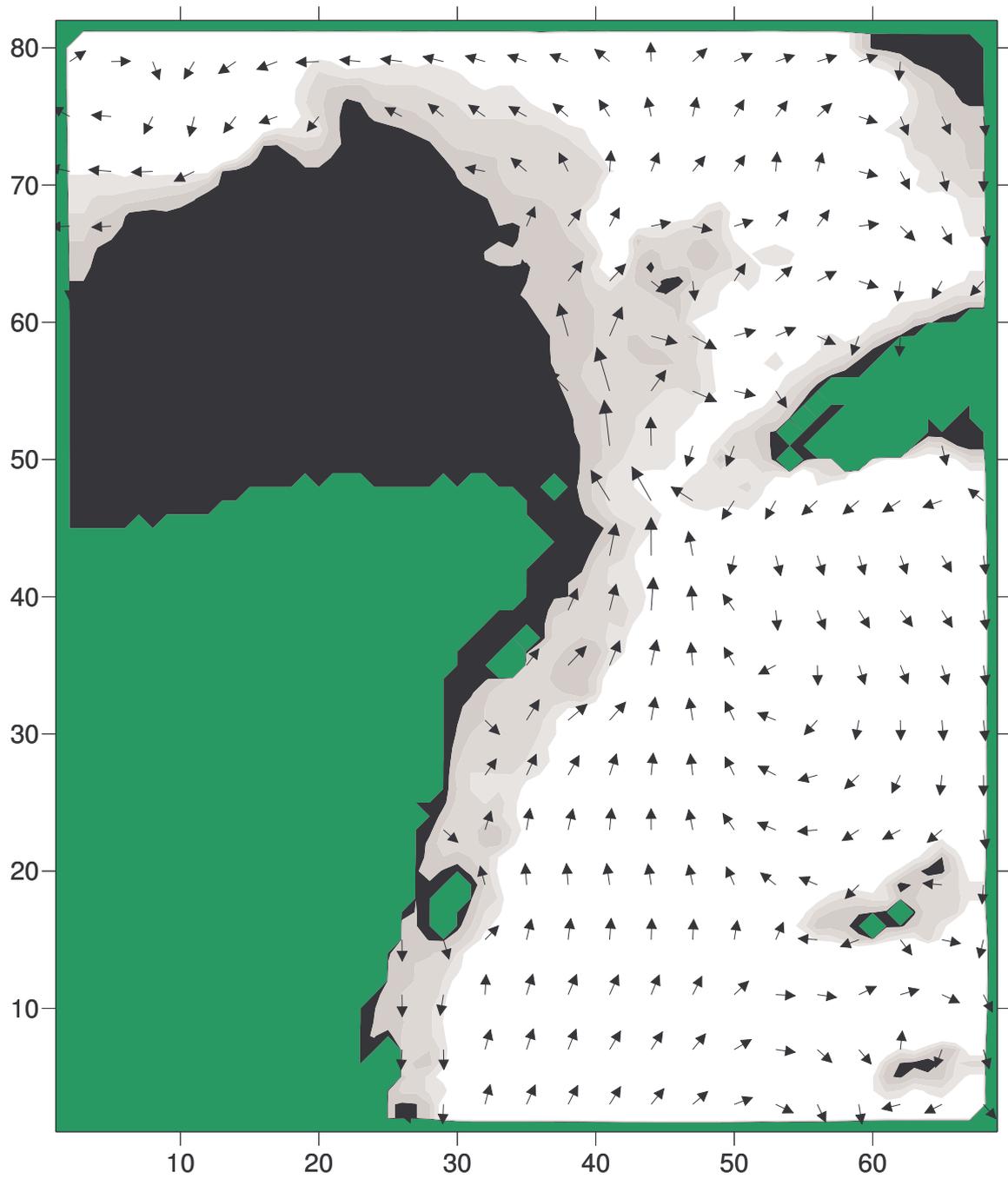


Figura 11.- Velocidad de la corriente marina a 500 metros de profundidad

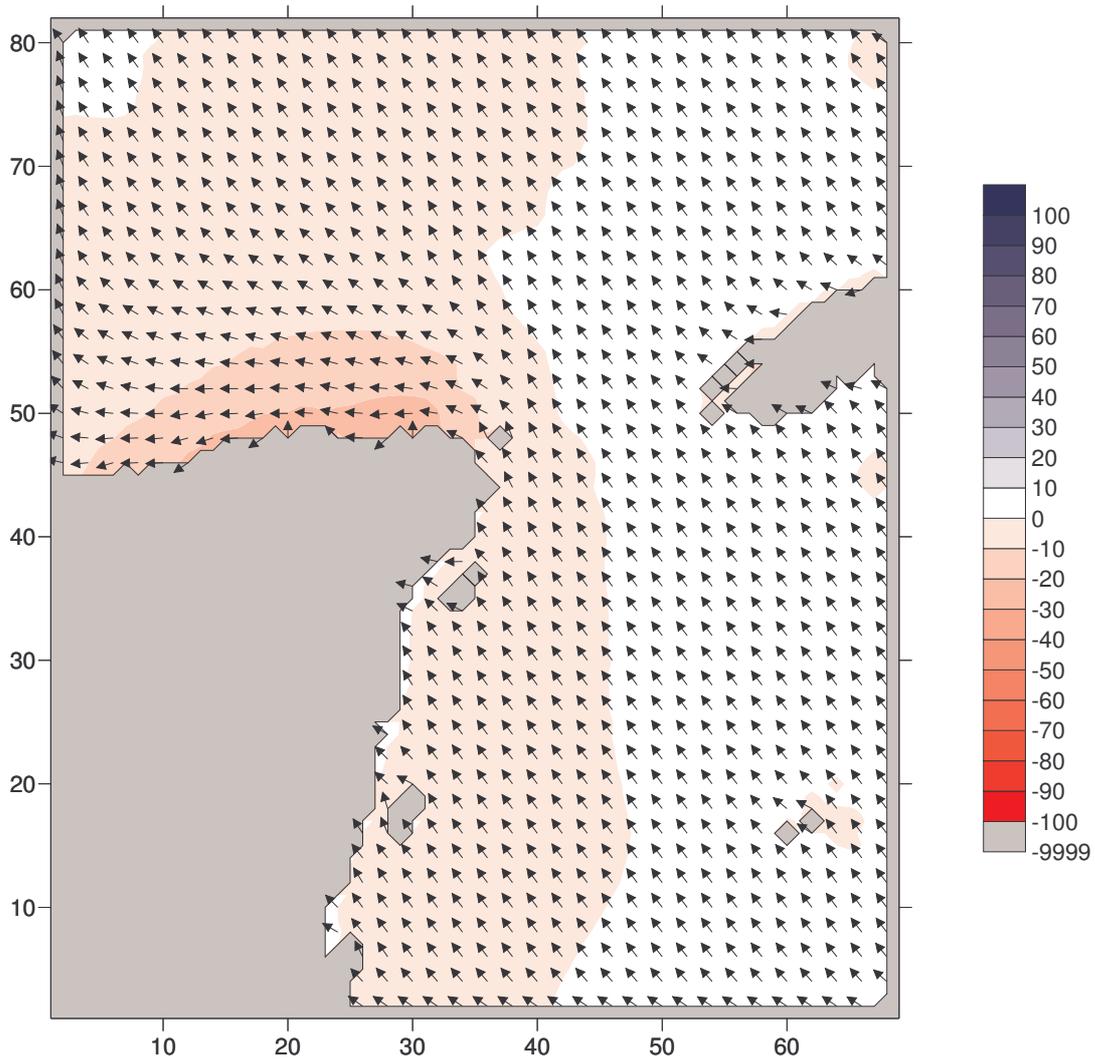


Figura 12.- Altura del nivel del agua en colores y velocidad de la corriente marina en superficie

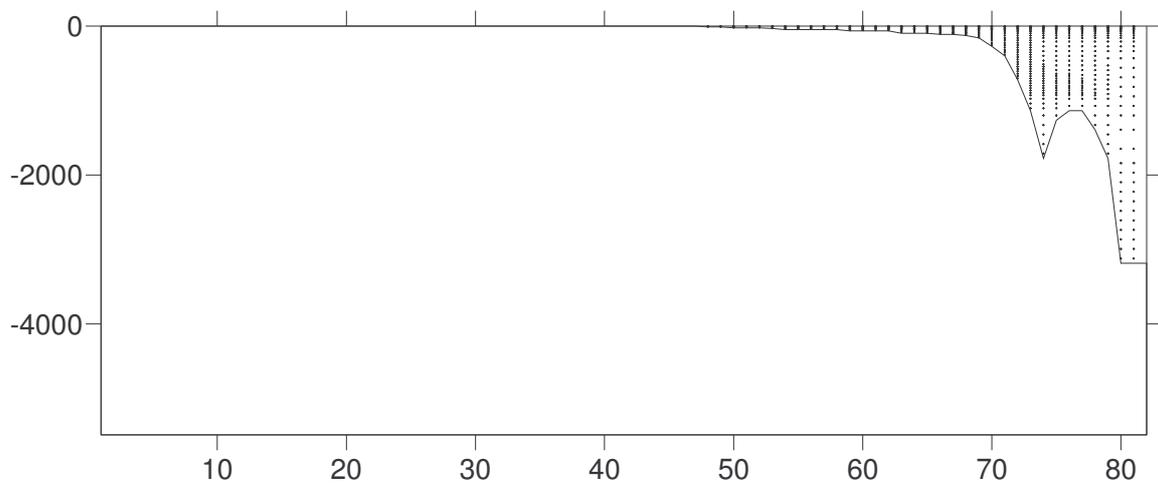


Figura 13.- Corte 20 E-W (referido a la figura 12) de batimetría y puntos de la malla

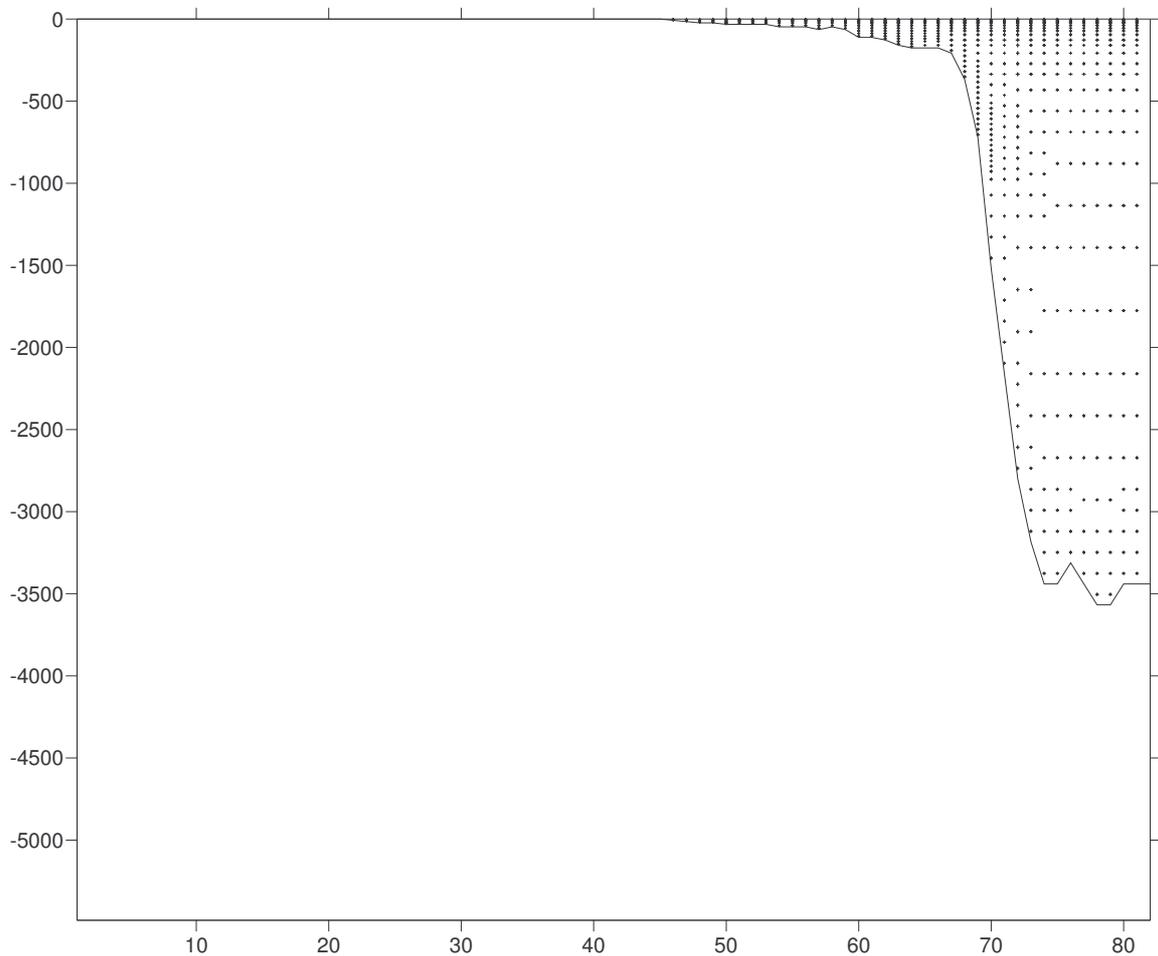


Figura 14.- Corte 10 E-W (referido a la figura 12) de batimetría y puntos de la malla

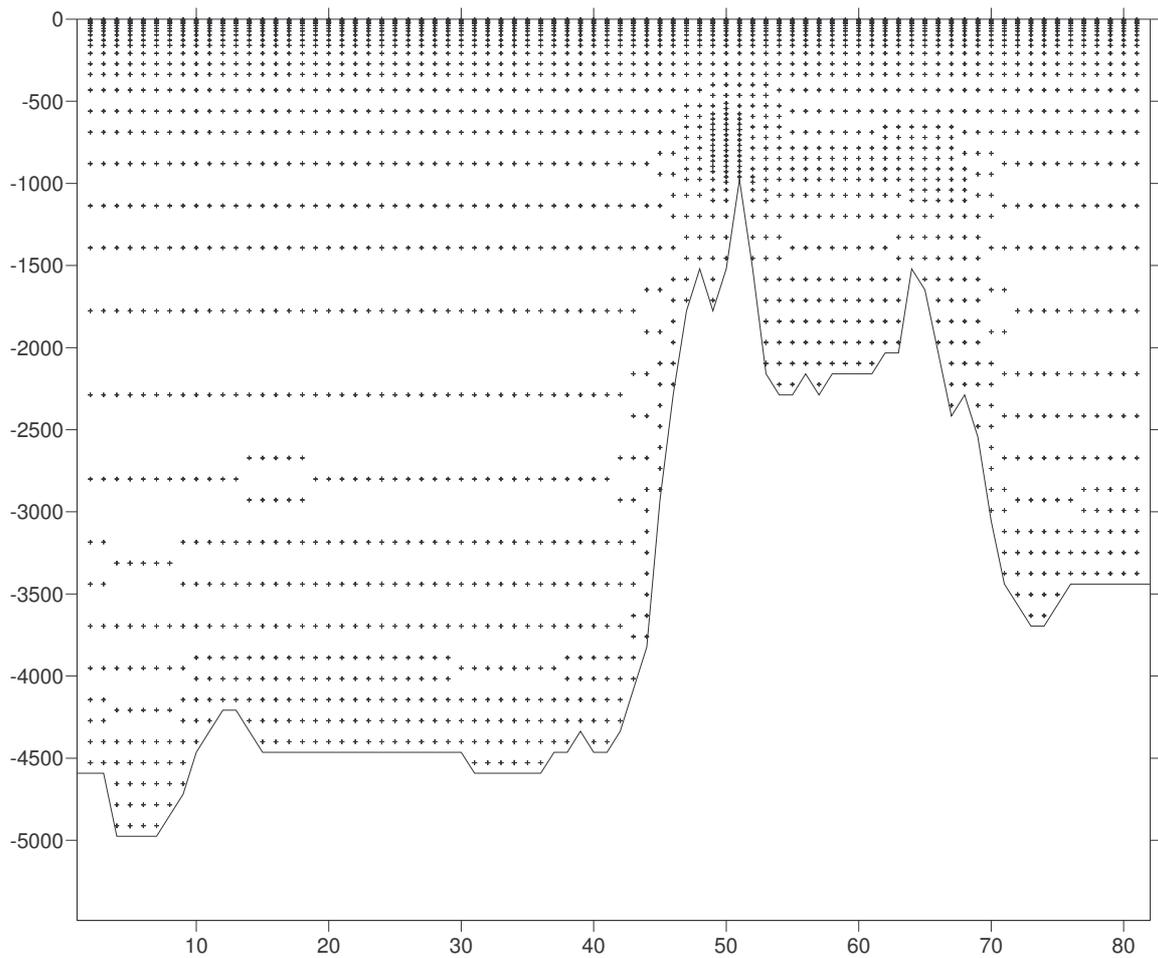


Figura 15.- Corte 50 E-W (referido a la figura 12) de batimetría y puntos de la malla

## **ANEXO C**

**Informe de actividades  
Julio 2007- febrero 2008  
Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos  
Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México**

**Proyecto Ubicación y Caracterización de Zonas en Peligro de Inundación por Marea de Tormenta en las Costas de México  
Clave 00048639**

### **Introducción**

Se detallan en este informe las actividades realizadas por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del II-UNAM en el proyecto de investigación "*Ubicación y Caracterización de Zonas en Peligro de Inundación por Marea de Tormenta en las Costas de México*", el cual está enmarcado dentro del Fondo Sectorial CNA-CONACYT.

Estas actividades se clasifican en 3 grupos principales: Adquisición de imágenes de satélite, desarrollo del modelo numérico para estimación de marea de tormenta y creación de mapas de clima marítimo para la vertiente atlántica. Al final del informe se describen los productos generados durante la vigencia de este proyecto

## **Actividades realizadas**

### **Adquisición de imágenes de satélite**

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 km<sup>2</sup>.

Por ser para uso académico y para entidades públicas, la empresa MAPA nos dió un precio preferencial de \$120 por km<sup>2</sup>. Estas imágenes se encuentran en disco DVD

En la Tabla 1 se detallan las imágenes compradas:

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.**

Estas imágenes harán parte del Sistema de Información Geográfico donde se podrá consultar a detalle la cota de inundación por marea de tormenta en cada uno de estos 21 sitios, actualmente el Centro EPOMEX se encuentra trabajando con dichas imágenes en el desarrollo de la arquitectura del SIG. 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**

## **Desarrollo del modelo numérico para la obtención de la marea de tormenta**

### **Descripción**

Se presentan a continuación tanto las ecuaciones de gobierno que resuelve el modelo numérico implementado para este proyecto de investigación, 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 sobrelevación de la superficie libre con respecto al nivel medio del mar, la cual se denomina  $\eta$ .

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.

## 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:

Equation Chapter (Next) Section 1

### Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (1.1)$$

Donde  $H = h + \eta$

$\eta$ , sobrelevación 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 en la dirección X***

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(UH)}{\partial t} + \frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz + \frac{\partial UVH}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} u'v' dz = \\ & fVH - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) + H \varepsilon_h \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \\ & 2H \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (1.2)$$

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
- $\varepsilon_h$ , coeficiente de viscosidad de remolino
- $P_a$  Presión atmosférica

### **Ecuación de cantidad de movimiento en la dirección Y**

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u'v' dz + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz = \\ & -fUH - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) + H \varepsilon_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \\ & 2H \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

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  $\Phi$  es la latitud media del área estudiada.

Para expresar las tensiones de Reynolds en las ecuaciones (1.2) y (1.3), 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**

Las condiciones de frontera utilizadas por el modelo bidimensional son las siguientes:

### **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 abiertas**

#### **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

$$\tau_{xz(\eta)} = C_a \rho_a W_x W \quad (1.4)$$

Donde  $C_a$  es el coeficiente de arrastre del viento, el cuál tiene un valor de 0.0026, Falconer (1994).  $\rho_a$  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  $\theta$  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

$$\tau_{xz(-h)} = \rho_o C_D \left| \vec{v} \right| u_{-h} \quad (1.5)$$

Dónde:  $\rho_o$  es la densidad del agua de mar,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre, el cuál es función del coeficiente de Chezy,  $|\bar{v}| = \sqrt{(u_{-h})^2 + (v_{-h})^2}$  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)

$$C_D = \frac{g}{C^2} \quad (1.6)$$

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.

### ***Coefficiente 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.

$$\epsilon_h = l^2 \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.7)$$

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 de gobierno del modelo bidimensional discretizadas en volumen finito**

Las 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 (1.2), es usualmente dividido de la

siguiente manera para permitir la formulación hiperbólica utilizada por diversos investigadores (Alcrudo y García-Navarro, 1993)

$$gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = gHS_{ox} + \frac{1}{2} g \frac{\partial (H^2)}{\partial x} \quad (1.8)$$

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 absurdos 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)

$$gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = g\eta S_{ox} + \frac{1}{2} g \frac{\partial (\eta^2 + 2\eta h)}{\partial x} \quad (1.9)$$

La formulación (1.9) 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 (1.3), las ecuaciones de ondas largas quedan de la siguiente manera

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (UH)}{\partial x} + \frac{\partial (VH)}{\partial y} = 0 \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (UH)}{\partial t} + \frac{\partial \left[ U^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left( UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz \right)}{\partial y} \\ & - \left( \frac{\partial^2 H \epsilon_h U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H \epsilon_h U}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2 2HU \epsilon_h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 H \epsilon_h U}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 H \epsilon_h V}{\partial y \partial x} = \\ & fVH - gHS_{ox} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x} \\ & \frac{\partial (UH)}{\partial t} + \frac{\partial \left[ U^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left( UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz \right)}{\partial y} \\ & - H \epsilon_h \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - 2H \frac{\partial U}{\partial x} \left( \frac{\partial \epsilon_h}{\partial x} \right) - H \frac{\partial \epsilon_h}{\partial y} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \\ & fVH - gHS_{ox} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial x} \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial \left( UVH + \int_{-h}^{\eta} u \dot{v} dz \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left[ V^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v \dot{v})^2 dz \right]}{\partial y} \\
 & - \left( \frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{\partial^2 H \varepsilon_h U}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 H \varepsilon_h V}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial 2HV \varepsilon_h}{\partial y \partial x} = \quad (1.12) \\
 & -fUH - gHS_{oy} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial y} \\
 & \frac{\partial(VH)}{\partial t} + \frac{\partial \left( UVH + \int_{-h}^{\eta} u \dot{v} dz \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left[ V^2 H + \frac{1}{2} g (\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v \dot{v})^2 dz \right]}{\partial y} \\
 & - H \varepsilon_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - 2H \frac{\partial V}{\partial y} \left( \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \right) = \\
 & -fUH - gHS_{oy} + \frac{1}{\rho_o} (\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o} H \frac{\partial P_a}{\partial y}
 \end{aligned}$$

Donde  $S_{oy}$  es la pendiente del fondo en la dirección Y. 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.

## Solucionador numérico

Las ecuaciones (1.10), (1.11) y (1.12) pueden escribirse en forma integral como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} q d\Omega + \int_{\Omega} \left( \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \right) d\Omega = \int_{\Omega} h d\Omega \quad (1.13)$$

Donde  $\Omega$  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:

$$\begin{aligned}
 q &= \begin{bmatrix} H \\ UH \\ VH \end{bmatrix} & f &= \begin{bmatrix} UH \\ U^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial x} - \frac{\partial 2HU \varepsilon_h}{\partial x} \\ UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial x} - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial y} - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial x} \end{bmatrix} \\
 g &= \begin{bmatrix} VH \\ UVH + \int_{-h}^{\eta} u' v' dz - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial y} - \frac{\partial H \varepsilon_h U}{\partial y} - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial x} \\ V^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz - \frac{\partial H \varepsilon_h V}{\partial y} - \frac{\partial 2HV \varepsilon_h}{\partial x} \end{bmatrix} \\
 h &= \begin{bmatrix} 0 \\ fVH - g\eta S_{ox} + \frac{1}{\rho_o}(\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o}H \frac{\partial P_a}{\partial x} \\ -fUH - g\eta S_{oy} + \frac{1}{\rho_o}(\tau_{yz(\eta)} - \tau_{yz(-h)}) - \frac{1}{\rho_o}H \frac{\partial P_a}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{1.14}
 \end{aligned}$$

Aplicando el teorema de Green (o de Gauss) al segundo término de la ecuación (1.13) se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} q d\Omega + \int_{\hat{S}} \hat{f} dS = \int_{\Omega} h d\Omega \tag{1.15}$$

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

$$\hat{f} = fn_x + gn_y \tag{1.16}$$

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.

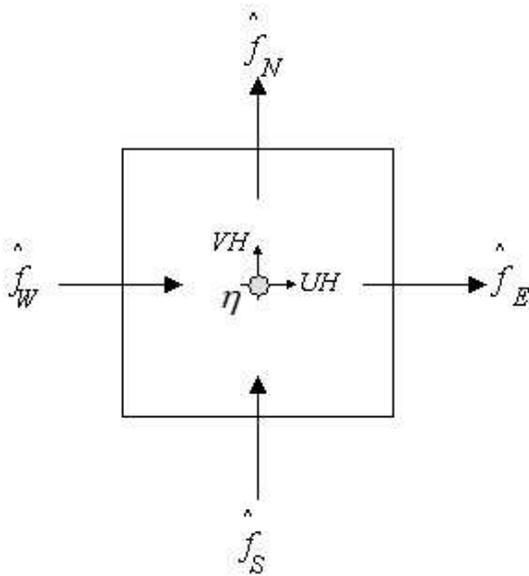
$$\hat{f} = f^I - \varepsilon_h f^V \tag{1.17}$$

Donde:

$$f^I = \begin{bmatrix} UHn_x + VHn_y \\ \left( U^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (u')^2 dz \right) n_x + \left( UVH + \int_{-h}^{\eta} u'v' dz \right) n_y \\ \left( UVH + \int_{-h}^{\eta} u'v' dz \right) n_x + \left( V^2H + \frac{1}{2}g(\eta^2 + 2\eta h) + \int_{-h}^{\eta} (v')^2 dz \right) n_y \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

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

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 5.



**Figura 5. Volumen de control en el que se indican las variables**

Para cada celda del dominio de cálculo, la ecuación (1.15) puede describirse de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Vq}{\partial t} \Big|_i = - \int_{\partial C_i} \hat{f} dS + AH \Big|_i \quad (1.19)$$

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  $\partial C_i$  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 (1.19) puede evaluarse en forma discreta con:

$$\int_{\partial C_i} \hat{f} dS = - \left( \hat{f}_E - \hat{f}_W + \hat{f}_N - \hat{f}_S \right) \Delta S \quad (1.20)$$

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 5, y  $\Delta S$  es la longitud de cada lado de la celda

## Estados de Riemman

Si se considera la celda  $i$  la representación de los estados de Riemman en cada una de sus caras es la siguiente

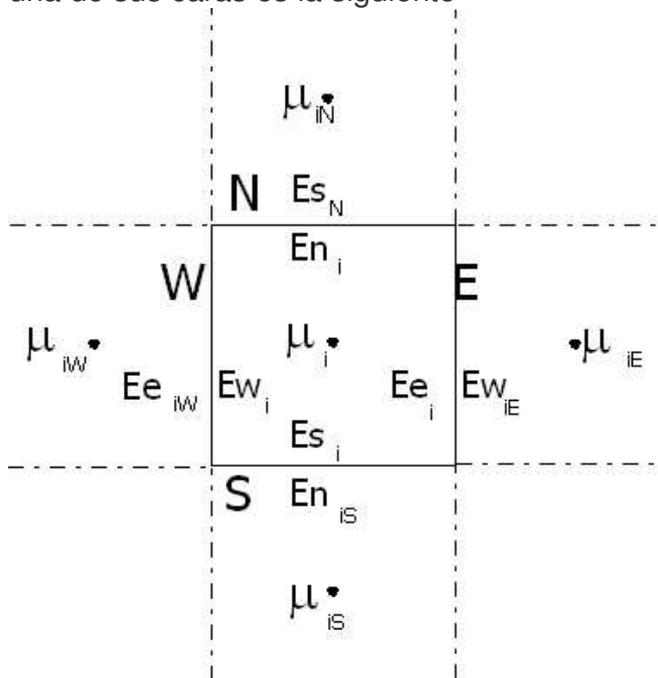


Figura 6. Estados de Riemman para la celda  $i$

Para cada una de las caras se calculan a continuación los estados de Riemman

### Estados de Riemman en la cara este

$$Ee_i = \mu_i + \frac{\Phi(r)}{2} (\mu_i - \mu_{iw}) \quad (1.21)$$

Donde:  $\Phi(r) = \max[0, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta)]$

$$r = \frac{\mu_{i_E} - \mu_i}{\mu_i - \mu_{i_W}}, \quad (1.22)$$

$$\text{si } |\mu_i - \mu_{i_W}| > 0 \text{ y } \mu_i > \mu_{i_E}, \mu_i > \mu_{i_W}, \Phi(r) = 0$$

$\Phi(r)$  es un limitador de pendiente, donde  $\beta$  puede obtener un valor entre 1 y 2, generalmente se toma como igual a 1.

Expandiendo las ecuaciones anteriores al flujo en la dirección este se obtiene:

$$\begin{aligned} \eta e_i &= \eta_i + \frac{\Phi(r_\eta)}{2} (\eta_i - \eta_{i_W}) \\ Qx e_i &= UH e_i = Qx_i + \frac{\Phi(r_{Qx})}{2} (Qx_i - Qx_{i_W}) \quad (1.23) \\ Qy e_i &= VH e_i = Qy_i + \frac{\Phi(r_{Qy})}{2} (Qy_i - Qy_{i_W}) \end{aligned}$$

### **Estados de Riemman para la cara oeste**

$$Ew_i = \mu_i - \frac{\Phi(r)}{2} (\mu_i - \mu_{i_W}) \quad (1.24)$$

Donde:  $\Phi(r) = \max[0, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta)]$

$$r = \frac{\mu_{i_E} - \mu_i}{\mu_i - \mu_{i_W}}, \quad (1.25)$$

$$\text{si } |\mu_i - \mu_{i_W}| > 0 \text{ y } \mu_i > \mu_{i_E}, \mu_i > \mu_{i_W}, \Phi(r) = 0$$

Expandiendo las ecuaciones anteriores al flujo en la dirección oeste se obtiene:

$$\begin{aligned} \eta w_i &= \eta_i - \frac{\Phi(r_\eta)}{2} (\eta_i - \eta_{i_W}) \\ Qx w_i &= Qx_i - \frac{\Phi(r_{Qx})}{2} (Qx_i - Qx_{i_W}) \quad (1.26) \\ Qy w_i &= Qy_i - \frac{\Phi(r_{Qy})}{2} (Qy_i - Qy_{i_W}) \end{aligned}$$

### **Estados de Riemman para la cara norte**

$$En_i = \mu_i + \frac{\Phi(r)}{2}(\mu_i - \mu_{i_s}) \quad (1.27)$$

Donde:  $\Phi(r) = \max[o, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta)]$

$$r = \frac{\mu_{i_N} - \mu_i}{\mu_i - \mu_{i_s}}, \quad (1.28)$$

si  $|\mu_i - \mu_{i_s}| > 0$  y  $\mu_i > \mu_{i_N}, \mu_i > \mu_{i_s}, \Phi(r) = 0$

Expandiendo las ecuaciones anteriores al flujo en la dirección este se obtiene:

$$\begin{aligned} \eta n_i &= \eta_i + \frac{\Phi(r_\eta)}{2}(\eta_i - \eta_{i_s}) \\ Qxn_i &= Qx_i + \frac{\Phi(r_{Qx})}{2}(Qx_i - Qx_{i_s}) \\ Qyn_i &= Qy_i + \frac{\Phi(r_{Qy})}{2}(Qy_i - Qy_{i_s}) \end{aligned} \quad (1.29)$$

### **Estados de Riemman para la cara sur**

$$Es_i = \mu_i - \frac{\Phi(r)}{2}(\mu_i - \mu_{i_s}) \quad (1.30)$$

Donde:  $\Phi(r) = \max[o, \min(\beta r, 1), \min(r, \beta)]$

$$r = \frac{\mu_{i_N} - \mu_i}{\mu_i - \mu_{i_s}}, \quad (1.31)$$

si  $|\mu_i - \mu_{i_s}| > 0$  y  $\mu_i > \mu_{i_N}, \mu_i > \mu_{i_s}, \Phi(r) = 0$

Expandiendo las ecuaciones anteriores al flujo en la dirección este se obtiene:

$$\begin{aligned}\eta_{s_i} &= \eta_i - \frac{\Phi(r_\eta)}{2}(\eta_i - \eta_{i_s}) \\ Q_{xs_i} &= Qx_i - \frac{\Phi(r_{Qx})}{2}(Qx_i - Qx_{i_s}) \\ Q_{ys_i} &= Qy_i - \frac{\Phi(r_{Qy})}{2}(Qy_i - Qy_{i_s})\end{aligned}\quad (1.32)$$

Para cada celda se obtienen las siguientes matrices con los valores correspondientes a los estados de Riemman.

$$\begin{aligned}\eta_{e_i}, \eta_{w_i}, \eta_{n_i}, \eta_{s_i} \\ Q_{xe_i}, Q_{xw_i}, Q_{xn_i}, Q_{xs_i} \\ Q_{ye_i}, Q_{yw_i}, Q_{yn_i}, Q_{ys_i}\end{aligned}\quad (1.33)$$

## Flujos no viscosos

Los flujos no viscosos son función de los estados de Riemman de la cara de la celda en la que se están calculando. A continuación se presenta el cálculo de los flujos no viscosos para las caras este y norte

### Flujo no viscoso este

$$Fie_i = \frac{1}{2} \left[ f(Ew_{iE}) + f(Ee_i) - |Ae|(\mu_{iE} - \mu_i) \right] \quad (1.34)$$

Donde:

$$f(Ew_{iE}) = \left[ \begin{array}{c} Q_{xw_{iE}} \\ \frac{(Q_{xw_{iE}})^2}{hw_{iE}} + g[\eta w_{iE}^2 + 2\eta w_{iE} hsw_{iE}] \\ \frac{Q_{xw_{iE}} Q_{yw_{iE}}}{hw_{iE}} \end{array} \right] \quad (1.35)$$

$$f(Ee_i) = \begin{bmatrix} Qxe_i \\ \frac{(Qxe_i)^2}{he_i} + g[\eta e_i^2 + 2\eta e_i hse_i] \\ \frac{Qxe_i Qye_i}{he_i} \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

Donde:

$$hsw_{i_E} = \frac{1}{2}(h_{i_E} + h_i), \quad hw_{i_E} = hsw_{i_E} + \eta w_{i_E} \quad (1.37)$$

$$hse_i = hsw_{i_E}, \quad he_i = hse_i + \eta e_i$$

Luego si escribimos el Jacobiano del lado este como  $|A_e| = R_e |V_e| L_e$  y calculamos los eigenvalores e eigen vectores,  $|A_e|$  se calcula como :

$$|A_e| = \frac{1}{2c} \begin{bmatrix} (c+u)|u-c| + (c-u)|u+c| & |u+c| - |u-c| & 0 \\ (c+u)(u-c)[|u-c| - |u+c|] & (u+c)|u+c| - (u-c)|u-c| & 0 \\ v[2c|u| + (c+u)|u-c| + (c-u)|u+c|] & v[|u+c| - |u-c|] & 2c|u| \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

$$u = \frac{u^+ \sqrt{h^+} + u^- \sqrt{h^-}}{\sqrt{h^+} + \sqrt{h^-}}; \quad v = \frac{v^+ \sqrt{h^+} + v^- \sqrt{h^-}}{\sqrt{h^+} + \sqrt{h^-}}; \quad c = \sqrt{\frac{g(h^+ + h^-)}{2}} \quad (1.39)$$

$$u^+ = \frac{Qxw_{i_E}}{hw_{i_E}}; \quad u^- = \frac{Qxe_i}{he_i}; \quad v^+ = \frac{Qyw_{i_E}}{hw_{i_E}}; \quad v^- = \frac{Qye_i}{he_i} \quad (1.40)$$

### **Flujo no viscoso norte**

$$Fin_i = \frac{1}{2} [f(ES_{i_N}) + f(En_i) - |An|(\mu_{i_N} - \mu_i)] \quad (1.41)$$

Donde:

$$f(Es_{i_N}) = \left[ \begin{array}{c} \frac{Qys_{i_N}}{hs_{i_N}} \\ \frac{Qxs_{i_N} Qys_{i_N}}{hs_{i_N}} \\ \frac{(Qys_{i_N})^2}{hs_{i_N}} + g[\eta s_{i_N}^2 + 2\eta s_{i_N} hss_{i_N}] \end{array} \right] \quad (1.42)$$

$$f(En_i) = \left[ \begin{array}{c} \frac{Qxn_i}{hn_i} \\ \frac{Qxn_i Qyn_i}{hn_i} \\ \frac{(Qyn_i)^2}{hn_i} + g[\eta n_i^2 + 2\eta n_i hsn_i] \end{array} \right] \quad (1.43)$$

Donde:

$$hss_{i_N} = \frac{1}{2}(h_{i_N} + h_{i,j}), \quad hs_{i_N} = hss_{i_N} + \eta s_{i_N} \quad (1.44)$$

$$hsn_i = hsn_{i_N}, \quad hn_i = hsn_i + \eta n_i$$

$$|Ae| = \frac{1}{2c} \left[ \begin{array}{ccc} (c+v)|v-c| + (c-v)|v+c| & 0 & |v+c| - |v-c| \\ -2cu|v| + u(c+v)|v-c| + u(c-v)|v+c| & 2c|v| & v[|v+c| - |v-c|] \\ (c+v)(v-c)[|v-c| - |v+c|] & 0 & (v+c)|v+c| - (v-c)|v-c| \end{array} \right] \quad (1.45)$$

$$u = \frac{u^+ \sqrt{h^+} + u^- \sqrt{h^-}}{\sqrt{h^+} + \sqrt{h^-}}; \quad v = \frac{v^+ \sqrt{h^+} + v^- \sqrt{h^-}}{\sqrt{h^+} + \sqrt{h^-}}; \quad c = \sqrt{\frac{g(h^+ + h^-)}{2}} \quad (1.46)$$

$$u^+ = \frac{Qxs_{i_N}}{hs_{i_N}}; \quad u^- = \frac{Qxn_i}{hn_i}; \quad v^+ = \frac{Qys_{i_N}}{hs_{i_N}}; \quad v^- = \frac{Qyn_i}{hn_i} \quad (1.47)$$

## Flujos viscosos

Para el cálculo de los flujos viscosos se discretizan en diferencias finitas hacia delante los términos que están acompañados por el término de la viscosidad de remolino como resultado de lo anterior se obtienen 4 flujos por cada celda

## Flujos totales y fuerzas externas

Una vez obtenidos los flujos no viscosos y los viscosos se procede a calcular los 12 flujos totales (4 para  $\eta$ , 4 para  $UH$  y 4 para  $VH$ ) con las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} Fte_i &= Fie_i - Fve_i \\ Ftw_i &= Fiw_i - Fvw_i \\ Ftn_i &= Fin_i - Fvn_i \\ Fts_i &= Fis_i - Fvs_i \end{aligned} \quad (1.48)$$

Las fuerzas externas se calculan bajo un esquema de diferencias finitas

$$\frac{C_d \rho_a W_x W}{\rho_o H} = \frac{C_d \rho_a W_x \sqrt{\left(W_{x_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\left(W_{y_{i_E}} + W_{y_{i_N}} + W_{y_{i_W}} + W_{y_{i_S}}\right)\right)^2}}{\rho_o \left(\frac{1}{2}\left(h_{i_E} + h_i\right) + \frac{1}{2}\left(\eta_{i_E}^t + \eta_i^t\right)\right)} \quad (1.49)$$

$$\frac{C_D \left| \bar{v} \right| u_{-h}}{H} = C_D \frac{U_i^t \sqrt{\left(U_i^t\right)^2 + \left(V_i^t\right)^2}}{\left(\frac{1}{2}\left(h_{i_E} + h_i\right) + \frac{1}{2}\left(\eta_{i_E,j}^t + \eta_i^t\right)\right)} \quad (1.50)$$

## Variación en el tiempo de las variables conservativas

La formulación de volumen finito, de manera simple es:

$$\Delta x \Delta y \left. \frac{\partial \mu}{\partial t} \right|_{i,j} = -\oint F_{t,i,j} + \Delta x \Delta y S_{i,j} \quad (1.51)$$

Resolviendo la integral

$$\Delta x \Delta y \left. \frac{\partial \mu}{\partial t} \right|_{i,j} = -(Fte_i - Ftw_i) \Delta y - (Ftn_i - Fts_i) \Delta x + \Delta x \Delta y S_i \quad (1.52)$$

Para el cálculo del valor de la sobreelevación  $\eta$ , los caudales  $UH$  y  $VH$  en la celda  $i$  en el tiempo  $t + \Delta t$  se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\eta_i^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} \left[ -(Ft\eta_{e_i} - Ft\eta_{w_i}) \Delta y - (Ft\eta_{n_i} - Ft\eta_{s_i}) \Delta x \right] + \eta_i^t \quad (1.53)$$

$$UH_i^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} \left[ -(FtUHe_i - FtUHw_i) \Delta y - (FtUHN_i - FtUHS_i) \Delta y + SUH_i \right] + UH_i^t \quad (1.54)$$

$$VH_i^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} \left[ -(FtVHe_i - FtVHw_i) \Delta y - (FtVHN_i - FtVHS_i) \Delta y + SVH_i \right] + VH_i^t \quad (1.55)$$

El proceso de cálculo es el siguiente

- Se calculan los estados de Riemman para cada lado de las celdas, es necesario utilizar un limitador de pendiente para realizar adecuadamente este cálculo
- Se calculan los flujos no viscosos con la aproximación de Roe para el solucionador de Riemman
- Los flujos viscosos se calculan por medio de diferencias finitas
- Se obtienen los flujos totales
- Se calculan el vector con los términos de fuerzas externas
- Se realiza el cálculo de las variables conservativas en el siguiente paso de tiempo

## Secado e inundación de celdas

Para representar adecuadamente el fenómeno de inundación por marea de tormenta el modelo numérico debe permitir que las celdas del dominio se sequen o inunden según sea el caso. A continuación se detallan los tres criterios implementados para representar la inundación o secado de las celdas costeras.

Esquema de malla

Para el cálculo de las velocidades se utiliza la menor profundidad entre dos celdas vecinas. Para evaluar si una celda está seca o mojada se utiliza la profundidad y la superficie libre en el centro de esta

Representación de la fricción

Para calcular el coeficiente de fricción C de Chezy se utiliza la expresión

$$C = 18 \log \left( \frac{12H}{k_s} \right) \quad (1.56)$$

Donde Ks es la altura de la rugosidad del lecho marino.

Por ejemplo si ks=0.03 m, cuando H sea menor a 0.003 m el coeficiente C será 1.5, lo cual convierte a la fricción en un valor muy alto, obligando a que las velocidades del flujo sean equivalentes a cero.

Límites de inundación – secado

Se implementan tres límites, para cada paso de tiempo se verifica la altura del agua  $H_i$  en cada celda del dominio y en función de su calado se realiza el secado ó mojado de la celda de la siguiente manera:

Si  $H_i < H_{\text{seco}}$ : La celda se considera seca, se anulan las velocidades y el valor de la superficie libre es igual a cero, esta celda se convierte entonces en tierra.

Si  $H_i > H_{\text{inund}}$ : La celda entra al dominio de cálculo, las velocidades se consideran iguales a cero y su superficie libre obtiene el valor del 10% de la superficie libre de la celda vecina.

Los valores de los límites de inundación y secado son los siguientes

$$\begin{aligned} H_{\text{seco}} &= 0.1K_s \\ H_{\text{inund}} &= 0.5K_s \end{aligned} \quad (1.57)$$

## Sistema de mallado

En la dinámica de fluidos computacional tanto la exactitud en la solución de un problema determinado como los requerimientos de recursos computacionales necesarios para obtener esta solución dependen de la calidad de la malla. Sobre esta malla las ecuaciones de gobierno y las condiciones de frontera son discretizadas y se emplea un método numérico para resolver las ecuaciones de gobierno.

Con el fin de maximizar la eficiencia computacional es deseable minimizar la cantidad de cálculos en aquellas zonas donde las variables dependientes (e.g. la sobreelevación de la superficie libre, la velocidad, la temperatura, la concentración del contaminante... etc.) tienen pequeños gradientes y el flujo es básicamente "suave". En aquellas regiones donde existen gradientes pronunciados de las variables estudiadas es necesario realizar un cálculo más detallado. El tipo de malla que se utilice debe reflejar lo anteriormente mencionado.

Para obtener una malla con las características señaladas se tienen tres opciones:  
a) utilizar una malla estructurada con anchos de celda pequeños que garantice una alta definición en las zonas importantes tiene la desventaja que resuelve con la misma definición zonas menos importantes.

b) recurrir a las mallas no estructuradas, en las cuales se generan dos clases de datos, una de éstas tiene la información de cada celda y la otra contiene la información concerniente a sus vecinos.

c) Recurrir a las mallas jerárquicas, en las cuales se maneja una sola estructura de información y en donde las zonas con poco interés se resuelven con anchos de celda grandes y las zonas en las cuales se desea una solución más detallada tienen anchos de celda pequeños. Al último tipo de mallas se conocen con el nombre de "jerárquicas" ya que la información de cada celda se guarda de manera similar a la estructura de un árbol genealógico, en donde cada celda tienen hermanas, además de que proviene de una celda madre y ésta a su vez también proviene de otra celda madre.

Una ventaja importante de utilizar mallas adaptables es que no es necesario hacer transformaciones matemáticas en las ecuaciones, ya que se puede trabajar con las mismas ecuaciones de una malla regular. Sin embargo es necesario realizar interpolaciones entre celdas vecinas, aunque ellas son simples y su implementación no disminuye la precisión de los resultados.

A continuación se expone brevemente las cualidades y deficiencias de cada uno de los tipos de mallas mencionados.

## **Antecedentes y estado del arte**

### ***Mallas estructuradas***

Este tipo de mallas ha sido utilizado en diversidad de sistemas, tales como cartesiano, cilíndricos o esféricos o incluso en sistemas curvilíneos. Entre sus principales ventajas está que la conexión entre una celda y sus vecinas es inmediata, lo que conlleva a un tiempo de cálculo bajo. Tal vez su principal deficiencia aparecen en problemas donde se requiera una alta resolución en los resultados, se vuelven deficientes desde el punto de vista computacional, porque todo el dominio de cálculo es resuelto con la misma además cuando se tienen fronteras irregulares es posible que se generen oscilaciones numéricas importantes.

Para disminuir sus desventajas, se puede realizar anidamiento de mallas, o utilizar mallas comprimidas. Aldridge y Davies (1993) utilizan este tipo de mallas en coordenadas polares para representar un flujo hidrodinámico tridimensional, Aguirre, P (1995) resuelve las ecuaciones de cantidad de movimiento empleando un sistema de coordenadas cartesianas, Ziegler y Harold (1997) utilizan un sistema anidado para resolver diversos fenómenos físicos, Timothy (1997) utiliza mallas comprimidas, Castanedo (2000) hace uso de este tipo de mallas en su modelo hidrodinámico bidimensional.

### ***Mallas no estructuradas***

Para generar este tipo de mallas es necesario utilizar dos estructuras de datos, en la primera se almacenan la información geométrica de cada celda; la otra contiene

la información necesaria para conectar las celdas con sus vecinas, es necesario un manejo matricial eficiente.

Puede generarse una malla de elementos triangulares a partir de dos métodos: los basados en la triangulación de Delaunay y los métodos de avance frontal; Mavriplis (1997) realiza una comparación entre estas dos técnicas. Mourad (2000) utiliza elemento finito para resolver problemas de flujos someros. Según Mavriplis los métodos de la triangulación de Delaunay se basan en las propiedades matemáticas de los triángulos, una de éstas es que el circunscrito de cualquier triángulo dentro de una malla solo puede contener los vértices de este triángulo. La alternancia de caras de celdas se utiliza para conectar una nube arbitraria de puntos dentro de una malla no-estructurada. La técnica de inserción de puntos se utiliza para generar una malla a partir de un conjunto de puntos semillas sembrados en la frontera del dominio de análisis.

Uno de los inconvenientes de este tipo de mallas es que la identificación de las celdas vecinas no es automática, lo que puede llevar a un aumento en el tiempo de cómputo.

### ***Mallas Jerárquicas***

Las mallas jerárquicas permiten crear sistemas de celdas no estructurados con la ventaja de que la información es almacenada en un árbol de datos, una estructura similar a un árbol genealógico, este tipo de mallas puede aplicarse a dominios bidimensionales (se conocen con el nombre de Quadtree o Three-tree, si las mallas son rectangulares o triangulares)) ó a dominios tridimensionales (Octree). En el primero de estos casos el dominio está compuesto por cuadriláteros, en los octrees está compuesto por hexaedros. Las mallas son irregulares ya que contienen celdas de diferentes tamaños, con lo cuál se logra una alta definición en las zonas de interés y baja resolución en otras partes del dominio.

Este tipo de mallas se utilizó inicialmente en el procesamiento de imágenes, tal como lo reporta Samet (1982 y 1990). Los quadtrees pueden utilizarse bajo diversos esquemas numéricos, Yerry y Shepard (1994) describen la generación de estas mallas para un análisis estructural basándose en elementos finitos. Gaspar y Jozna (1991), Gaspar (1996) y Greaves y Borthwick (1998) utilizan este tipo de mallas para la predicción de flujos incompresibles separados con bajos números de Reynolds. Rogers, (2002) utilizó mallas jerárquicas para resolver la rotura de embalses bajo un esquema Godunov, Bautista, (2005) utiliza éste tipo de mallas para analizar el fenómeno de marea de tormenta. (Borthwick, 2000) aplica mallas jerárquicas al transporte bidimensional de contaminantes. Koo Yong Park y Borthwick (2001) describen una malla adaptable para un modelo interacción oleaje corriente

Los principales beneficios de este tipo de mallas son: a) su generación es rápida, b) se pueden utilizar para cualquier dominio, c) no es necesario transformar las

ecuaciones de gobierno, d) proporcionan una estructura ordenadas de datos que permiten una identificación plena de cada tipo de celdas; con estas mallas el tiempo de cálculo se reduce, aproximadamente, a una cuarta parte si se compara con una modelación hecha con una malla de celdas regulares.

Dentro de sus inconvenientes está que se presentan celdas vecinas de diversos tamaños, por lo cual es necesario realizar un proceso adicional para otorgar una relación adecuada entre vecinos, esto con el fin de evitar interpolaciones complicadas

En esta tesis se utilizará un tipo de mallado jerárquico, basado en el trabajo de Stallard, 2002 pero con una numeración de celdas más eficiente. Se escogió este tipo de mallado ya que es el que proporciona un adecuado balance entre generación, estructura de almacenamiento y facilidad de aplicación a los modelos numéricos posteriormente utilizados

## **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 cuál 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 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

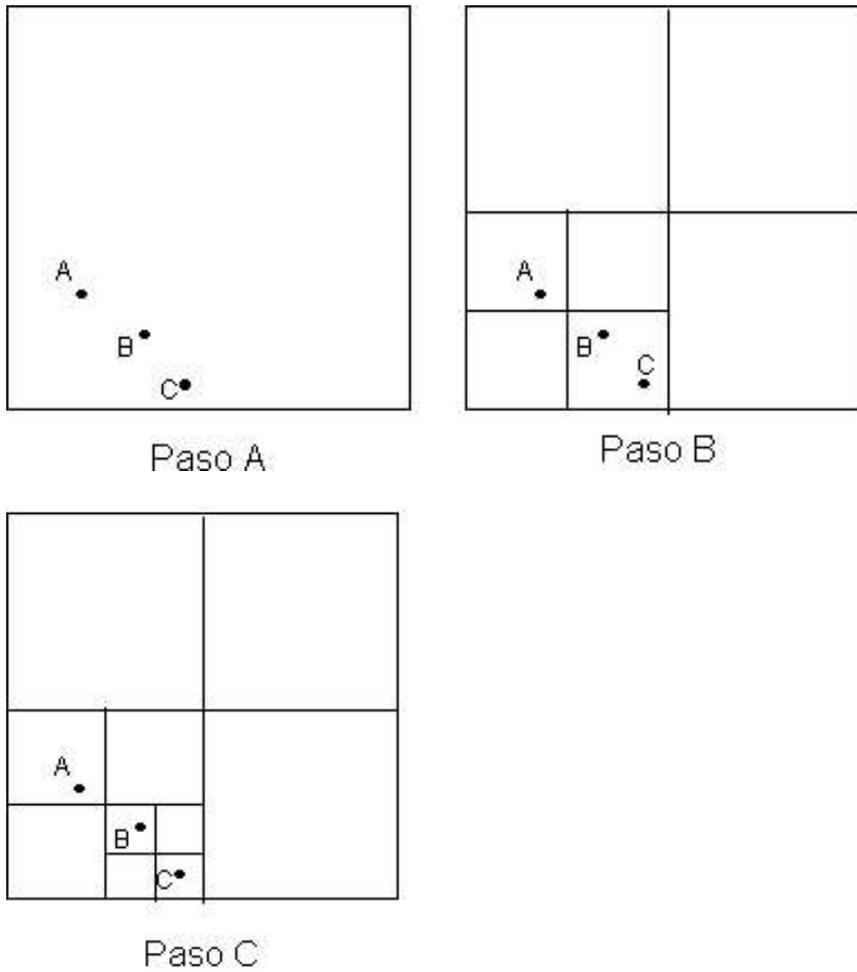
donde se revisen las celdas para garantizar que no existan relaciones 1 a 4 ó 1 a 8.

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 7 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 7. 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 7 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

### Equation Chapter (Next) Section 2

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:

$$x_{mid}^M = 0.5 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{2^{m+1}} \left( 2INT \left( \frac{N_m - 1}{2} \right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$y_{mid}^M = 0.5 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{2^{m+1}} \left( 2N_m - 4INT \left( \frac{N_m - 1}{2} \right) - 3 \right) \quad (2.2)$$

Donde  $M$  es el nivel de subdivisión, e  $INT$  se refiere a la parte entera del número entre paréntesis.  $N_m$  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:

$$\Delta l = \frac{1}{2^M} \quad (2.3)$$

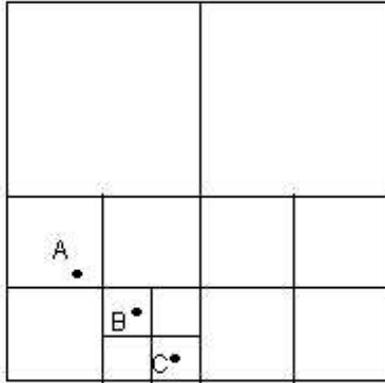
Para la celda que contiene el punto C de la figura 1 el ancho es 0.125

## 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

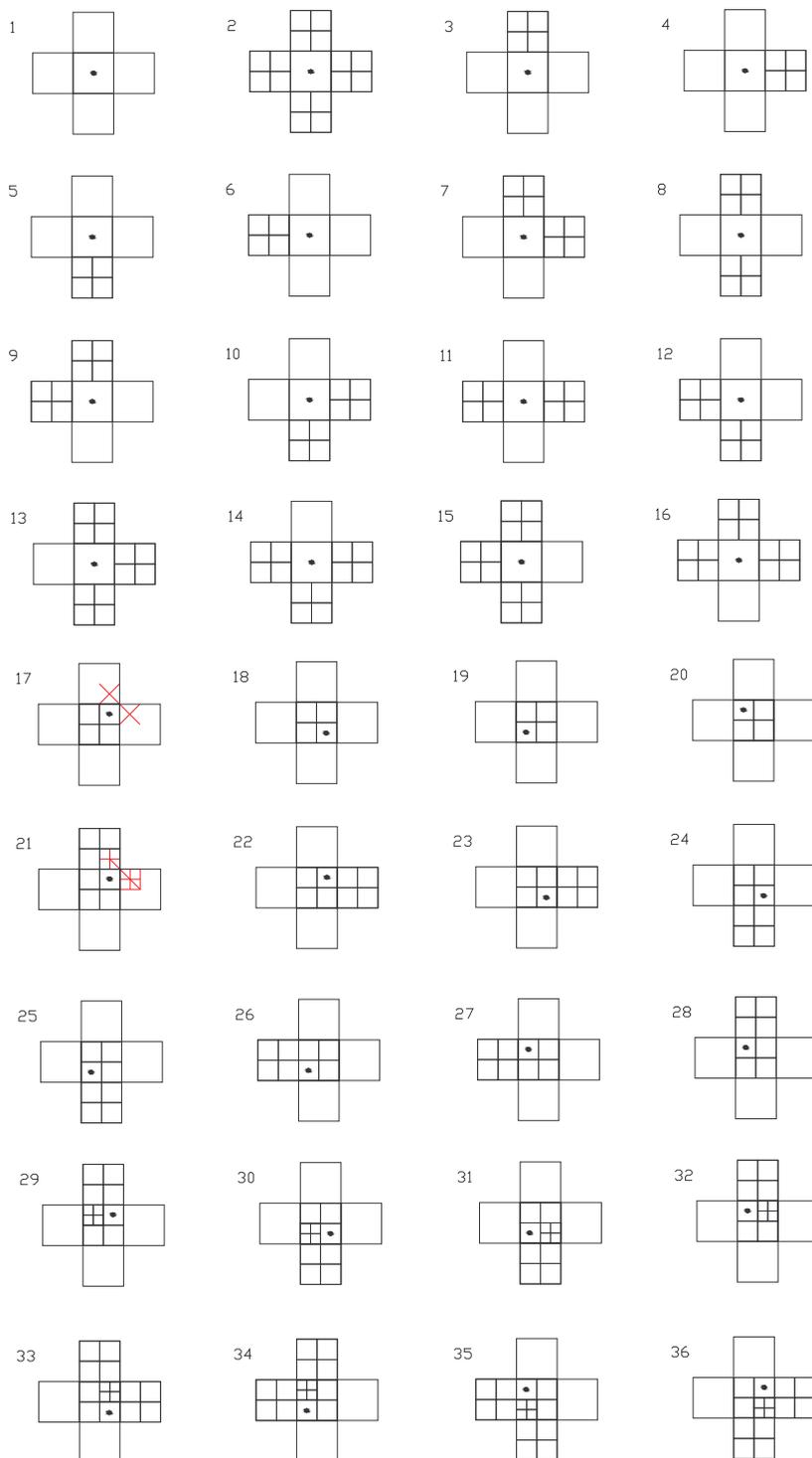
hasta que todas las celdas son revisadas. En el paso D de la Figura 8 presenta la malla Quadtree ya regularizada para los 3 puntos semillas.



Paso D

**Figura 8. 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 9 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.

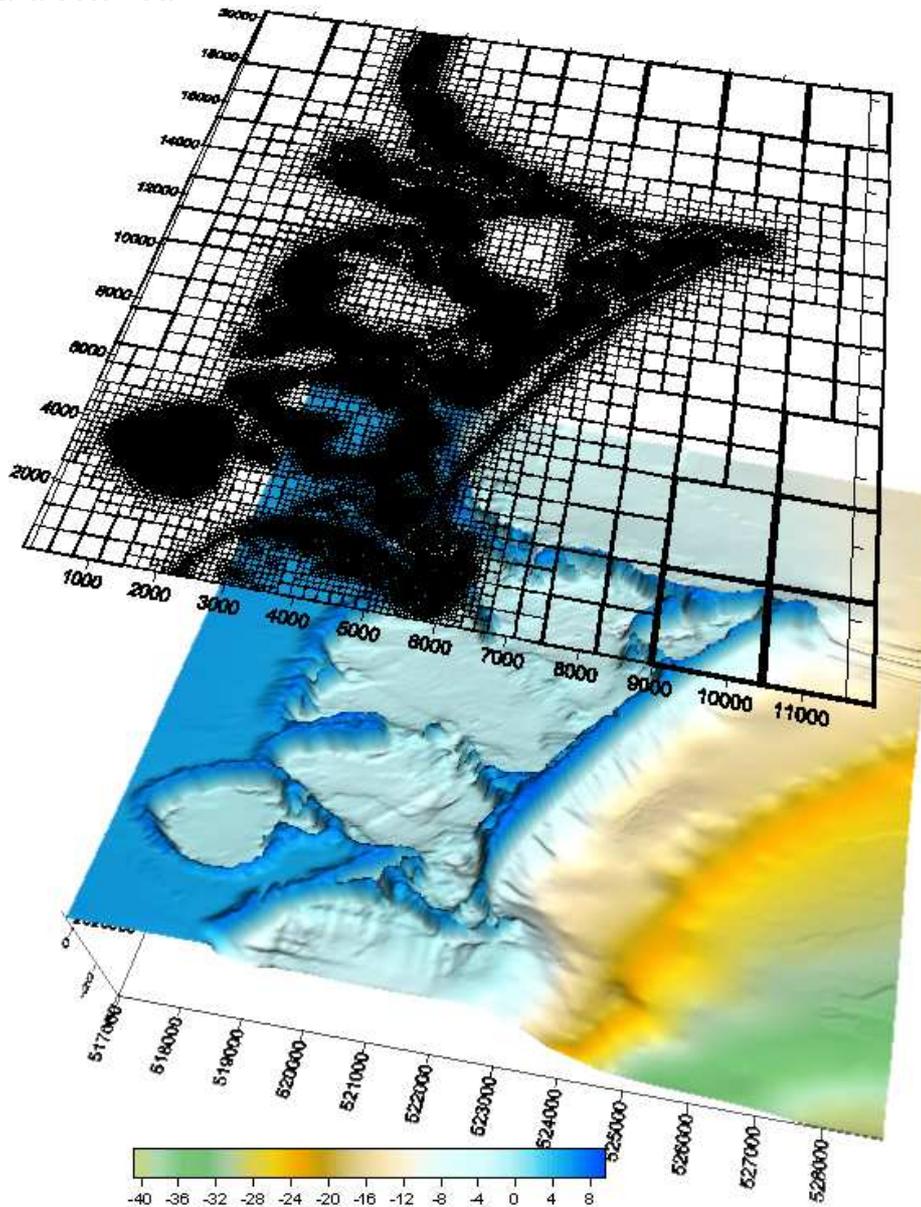


**Figura 9. Tipos de celdas interiores con profundidad positiva**

### **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.

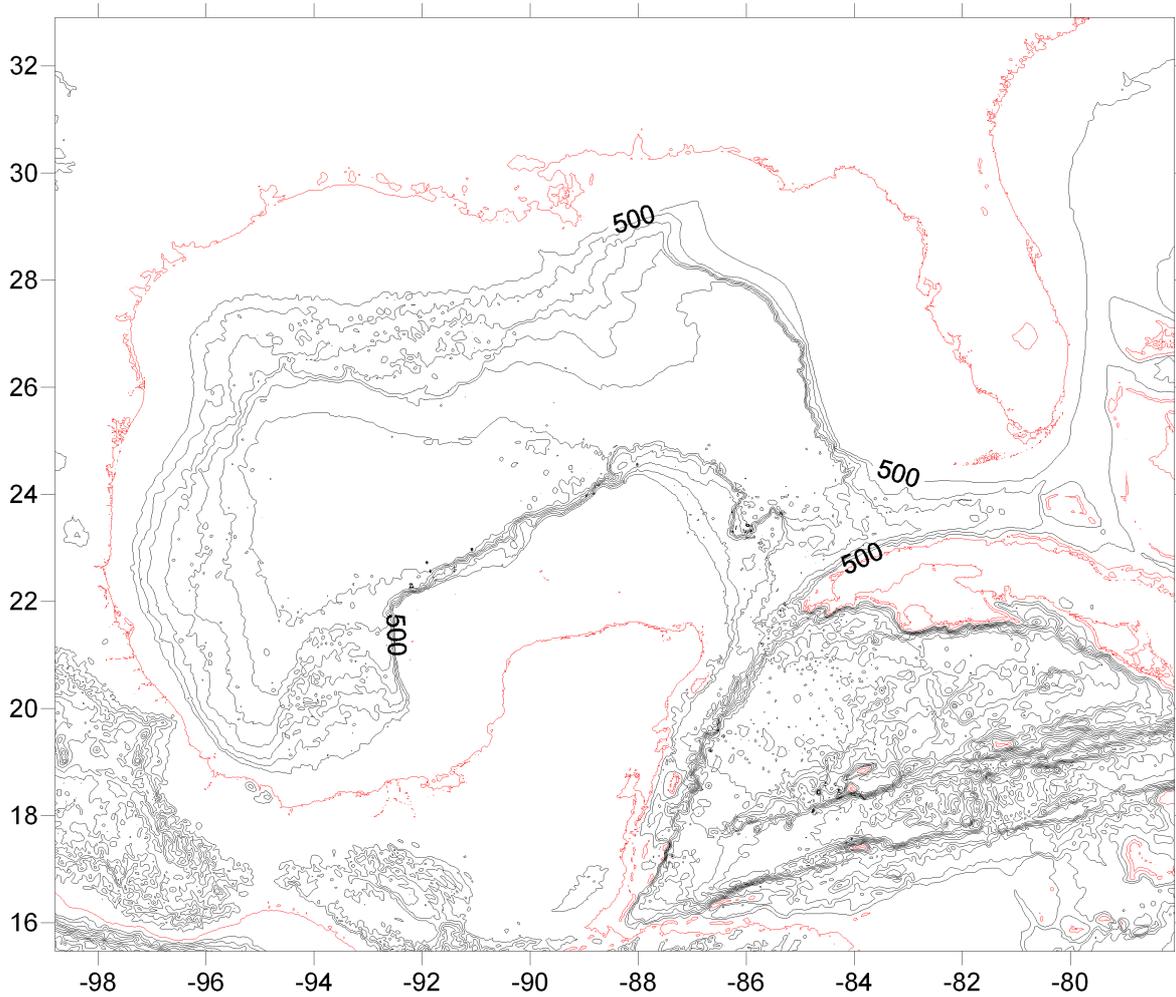


**Figura 10. Batimetría de la bahía de Acapulco.**

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](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html)), en la Figura 12 se observa la región obtenida

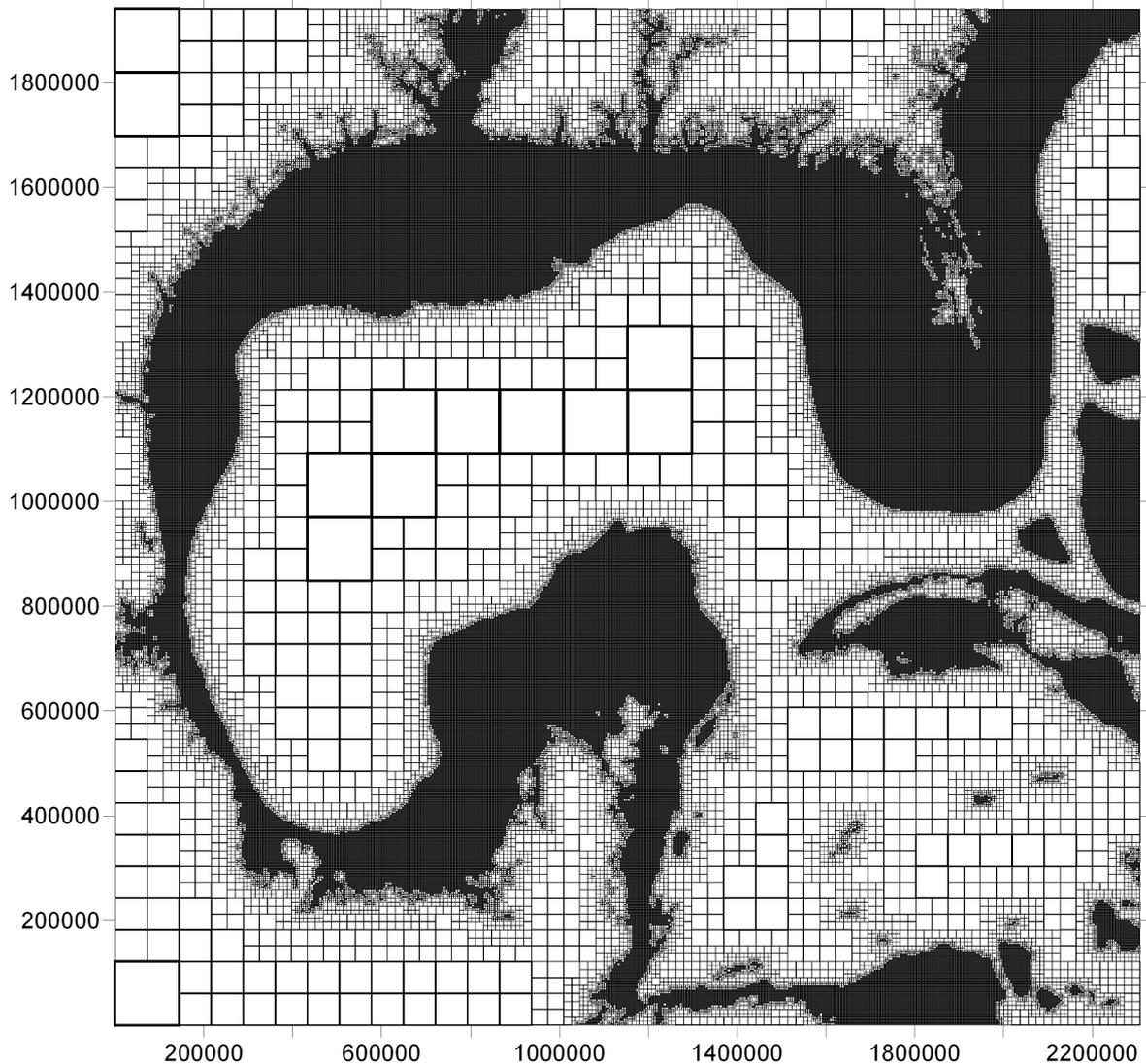


**Figura 11. Línea de costa obtenida de las cartas de la Secretaría de Marina de México.**



**Figura 12. 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 13 muestra la malla anteriormente descrita



**Figura 13. Malla Quadtree para el Golfo de México.**

### **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.

### **Propagación de una onda larga por un canal de ancho y fondo variable**

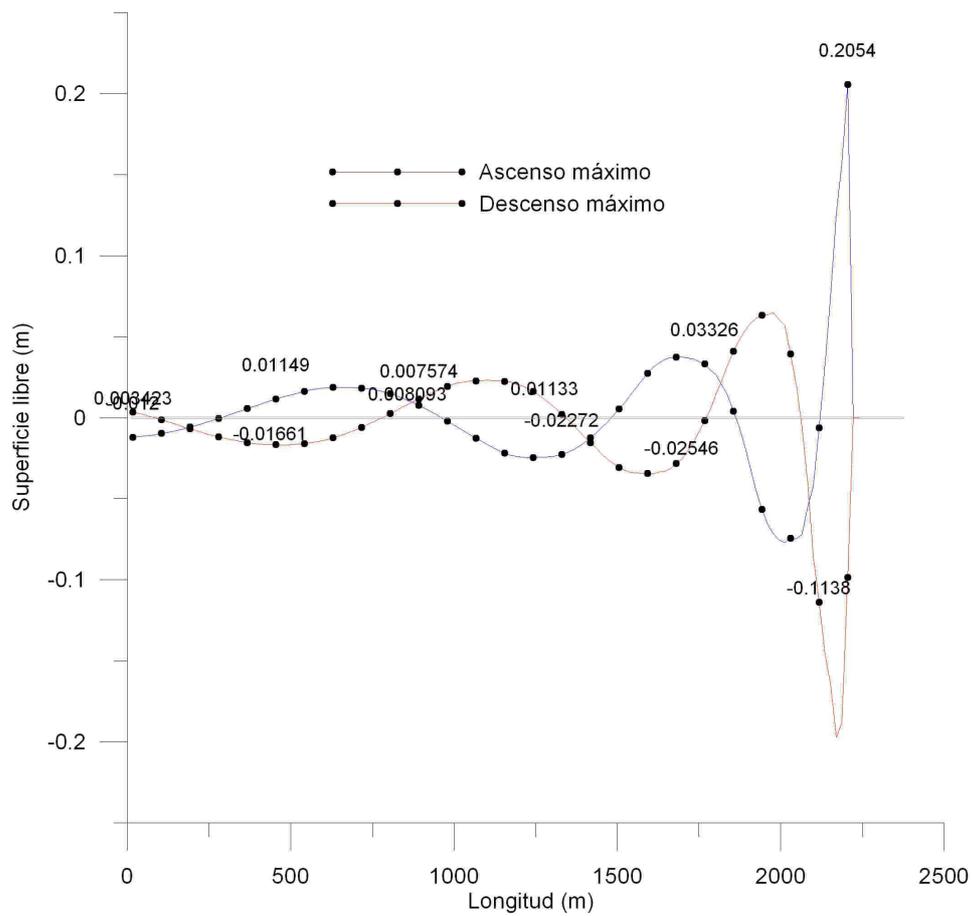
Para este caso se propaga una onda larga con amplitud de 0.02 m y periodo de 100s, por un canal con las siguientes medidas: largo de 2500 m, anchura igual a

$b = nx$ , donde  $n=0.2$  y profundidad inicial de 25 m, y profundidades siguientes iguales a  $h = mx$  donde  $m=0.01$ . Se desprecian todos los términos disipativos. En la Figura 14 se presenta un corte vertical de la superficie libre obtenida con el modelo bidimensional, para los instantes de tiempo  $t=2000$  y  $2200s$ , en el cual se observa que la amplitud máxima se presenta al final del canal y es igual a 0.20 m, el mismo resultado obtenido con la solución numérica propuesta presentada por (Castanedo, 2000).

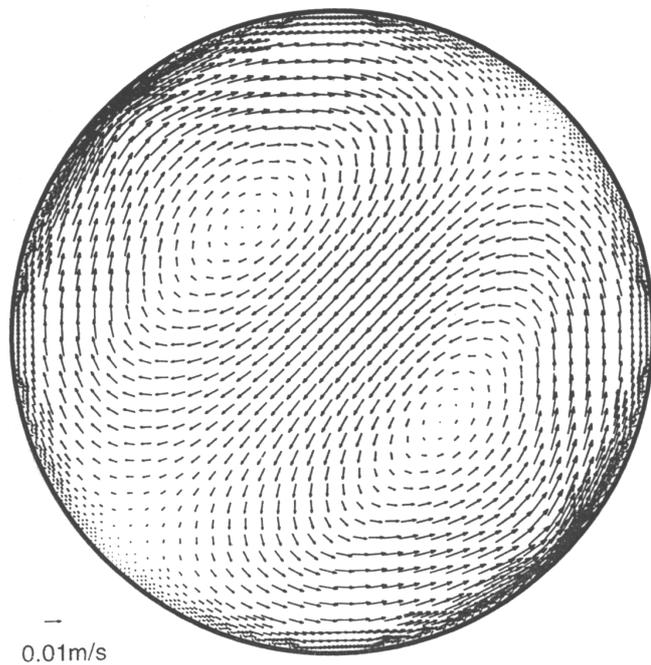
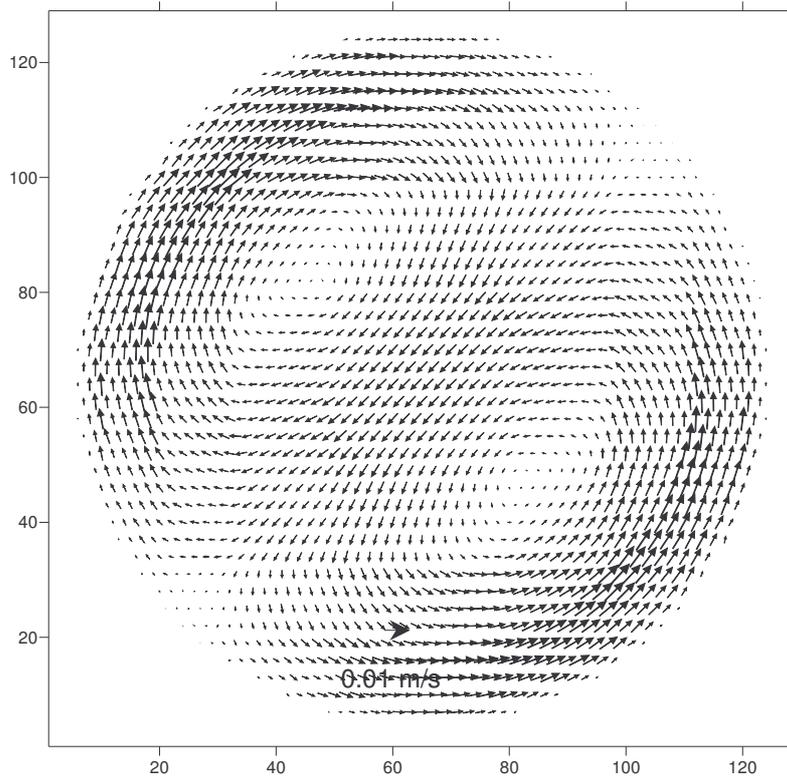
### **Acción del viento sobre una cuenca cerrada de batimetría variable**

Se presenta el funcionamiento del modelo en dos dimensiones para una batimetría cerrada y variable sobre la cual actúa un esfuerzo de viento variable, tal como lo propone (Rogers,2001). La batimetría de análisis es circular de radio máximo 190m, con una profundidad en el centro de 0.80 m y en el contorno de 0.50m, el esfuerzo de viento inicia en cero y llega  $0.02 \text{ N/m}^2$  al cabo de 500s, a partir de éste momento permanece constante, la dirección del viento es Noreste durante toda la simulación.

El resultado obtenido para el instante de tiempo  $t=5000s$  se muestra en la Figura 15, el cual al compararse con el resultado obtenido por (Rogers,2001) es prácticamente igual. La velocidad máxima obtenida es de 0.012 m/s, se observan dos remolinos simétricos cuyas velocidades son opuestas a las del viento en el centro de la cuenca y tiene la misma dirección en los bordes de ésta. Lo anterior es producto de la combinación de viento constante con la batimetría variable.



**Figura 14. Solución numérica para una onda larga propagándose sobre un canal de ancho y fondo constantes.**



**Figura 15. Comparación de circulación inducida por viento con modelo 2D y reportada por Rogers (2001)**

## **Creación de mapas de clima marítimo para la Vertiente Atlántica**

A continuación se describe brevemente una herramienta que fue desarrollada con el fin de obtener el clima marítimo (oleaje y viento) para el golfo de México, esta herramienta se publicará como un Sistema de Información Geográfico.

### ***Introducción***

La determinación de las magnitudes de los agentes marinos como el oleaje (altura, periodo y dirección) y el viento (velocidad y dirección) es trascendental 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 del oleaje.

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. Por ello, se ha desarrollado una metodología que utiliza dos modelos numéricos que han permitido caracterizar y construir un 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.

### ***Metodología***

Para la elaboración del atlas se utilizó un modelo híbrido compuesto por un modelo de tercera generación "WAM" (WAMDI, 1988) que estima el campo de oleaje en aguas profundas como función de datos de viento, y otro de segunda generación "HURAC" (Silva et al., 2002) que a partir de datos ciclónicos calcula los campos de viento, oleaje y presión atmosférica. No obstante que el modelo WAM es capaz de reproducir los efectos asociados con ciclones tropicales, no existe ninguna base de datos histórica con más de 20 años de registros con la resolución espacio - temporal necesaria para forzar el modelo y obtener resultados confiables.

El modelo WAM resuelve la ecuación bidimensional de transporte de energía del oleaje, en la cual la función de densidad espectral depende de la frecuencia y dirección del oleaje, así como de las coordenadas de posición de un grupo de olas dentro de una malla de cálculo, para un determinado lapso de tiempo. En ésta

ecuación se consideran las acciones del viento y la resonancia entre componentes, así como la disipación de energía.

Para forzar el modelo WAM se utilizaron los datos del proyecto de re-análisis del National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Este banco de información es el más completo en la actualidad con acceso libre. La base de datos de viento que se tiene en dicho proyecto se genera a partir de los datos históricos (de 1948 a la fecha) obtenidos por instrumentos de medición tales como boyas, barcos y satélites, que se encuentran dispersos alrededor del mundo. Sin embargo una de las principales desventajas que tiene este banco de información, radica en que sus registros proporcionan una baja resolución tanto espacial como temporal. La magnitud del viento se facilita en un lapso de tiempo de seis horas, espaciados a dos grados tanto en latitud como en longitud. A pesar de esta inconveniencia, existen estudios que afirman que la información de vientos que posee el NCEP/NCAR es adecuada para realizar predicciones de oleaje, con excepción de aquellos fenómenos que ocupan un área relativamente pequeña o que su evolución es relativamente rápida, como es el caso de los huracanes.

La estimación de las magnitudes del oleaje y viento para condiciones asociadas a ciclones tropicales se obtuvo mediante el uso del modelo HURAC; el cual calcula los campos de vientos y presiones atmosféricas en función del radio ciclostrófico. Con estos datos se determinan los valores de la altura y periodo del oleaje para depresiones, tormentas tropicales y huracanes.

Para validar el modelo híbrido WAM-Hurac, se utilizaron datos de las boyas oceanográficas del National Data Bouy Center (NDBC). En la Figura 16 se presenta en: A) los resultados del modelo WAM, en B) los resultados del modelo HURAC, en C) la combinación de ambos resultados (modelo híbrido) y en D) la comparación entre los datos medidos por las boyas y los obtenidos con el modelo híbrido; en dicho inciso se aprecia la mejora significativa en la predicción del oleaje al combinar los modelos.

### ***Aplicación***

A partir de los datos obtenidos con el modelo híbrido, se desarrolló un Atlas del Clima Marítimo para la vertiente del Atlántico Mexicano Figura 17; A través de un disco DVD se podrá acceder al atlas y consultar las magnitudes de altura, periodo y dirección del oleaje así como, la velocidad y dirección del viento para un periodo de tiempo que abarca los años desde 1948 al 2007. La información se encuentra en una malla de 817 celdas para el Atlántico, con una resolución espacial de 0.25 por 0.25 grados.

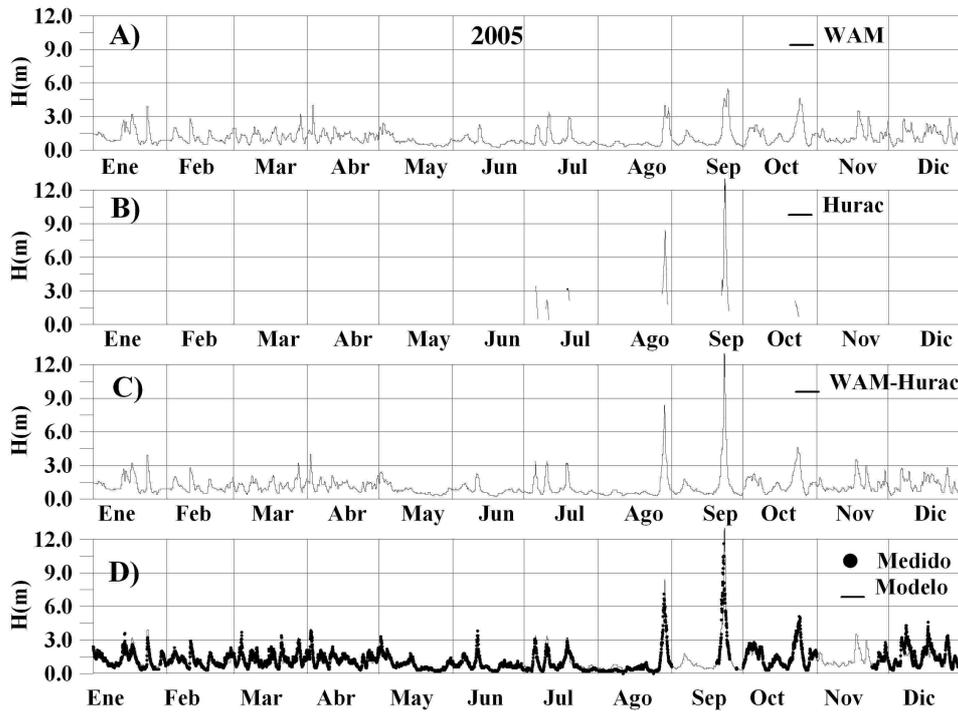


Figura 16. Resultados de la validación del modelo híbrido

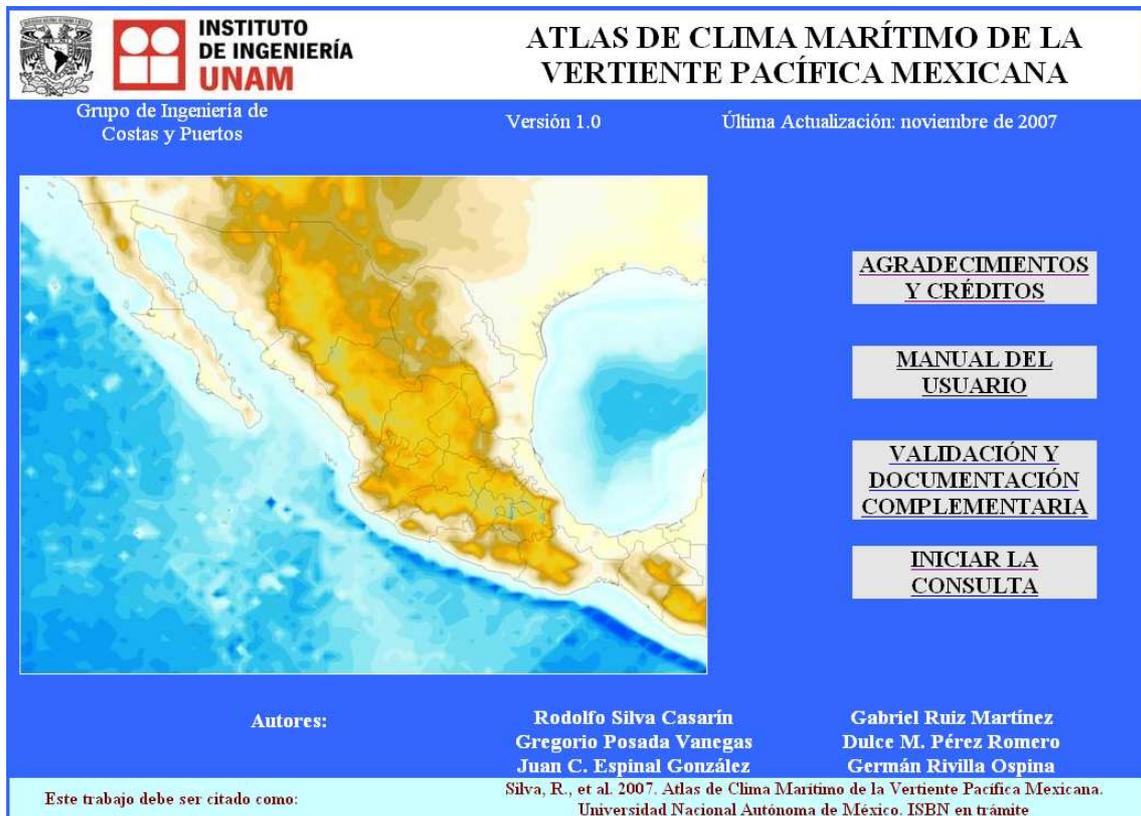
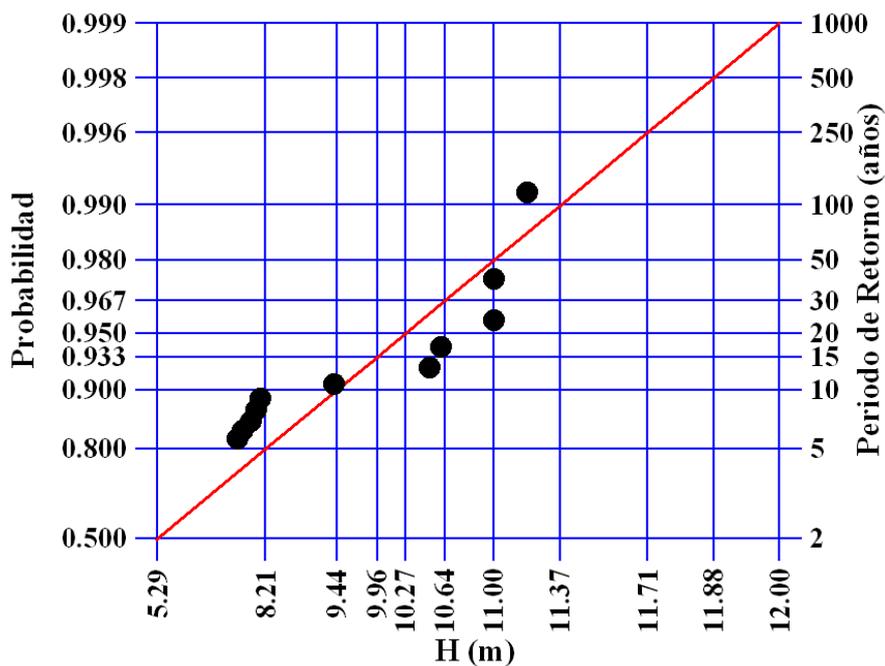


Figura 17. Portada del Atlas del Clima Marítimo de las Vertientes Atlántica Mexicana y Pacífica Mexicana.

Mediante un análisis de largo plazo, de manera anual o estacional, se generaron gráficas que proporcionan las distribuciones de probabilidad, de ocurrencia y excedencia, para eventos extremos de oleaje y viento (Figura 18 y Figura 19). Además, se realizaron rosas de oleaje y viento para conocer la dirección predominante de estos (Figura 20). Con la finalidad de proporcionar información útil para el diseño de obras marinas y análisis del comportamiento de las playas, se crearon histogramas de largo plazo donde se representa la probabilidad conjunta de altura de ola y periodo, al igual que se construyeron mapas en los que se da un panorama general del comportamiento del oleaje y viento para un periodo de retorno determinado, Figura 21 y Figura 22.



**Figura 18.** Gráfico de la distribución de probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno de la altura significativa.

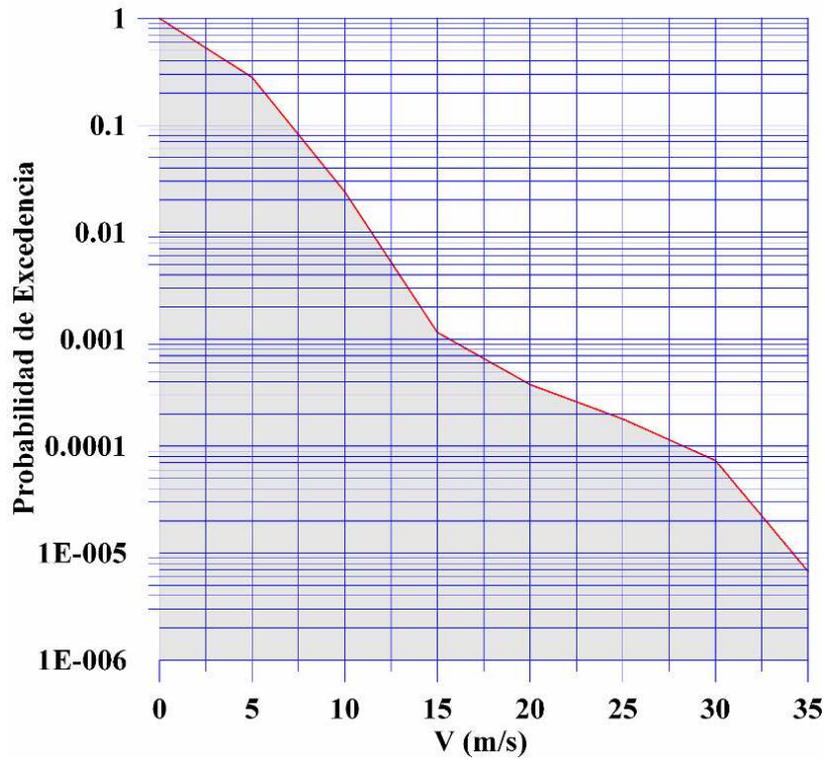


Figura 19. Gráfico de la probabilidad de excedencia de viento para el Puerto de Tamaulipas.

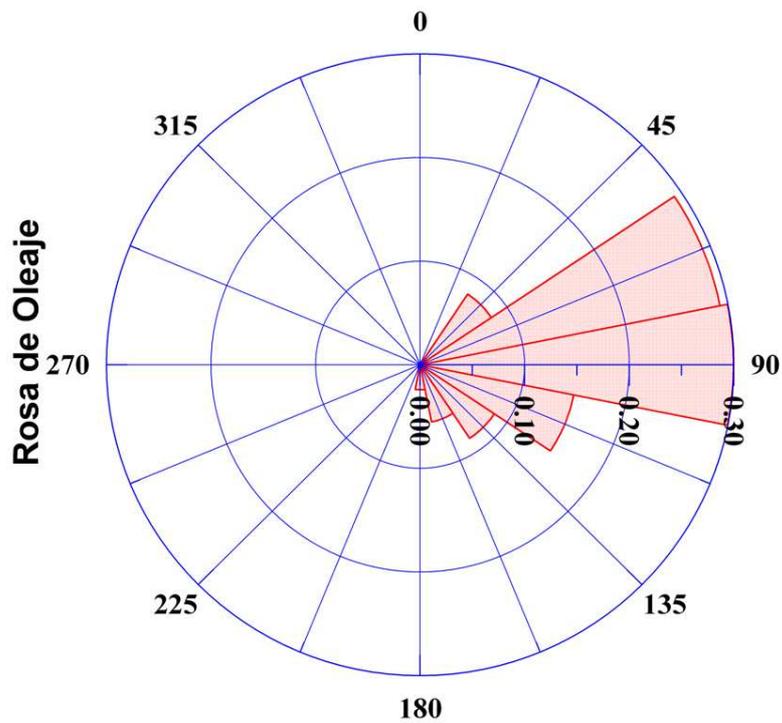
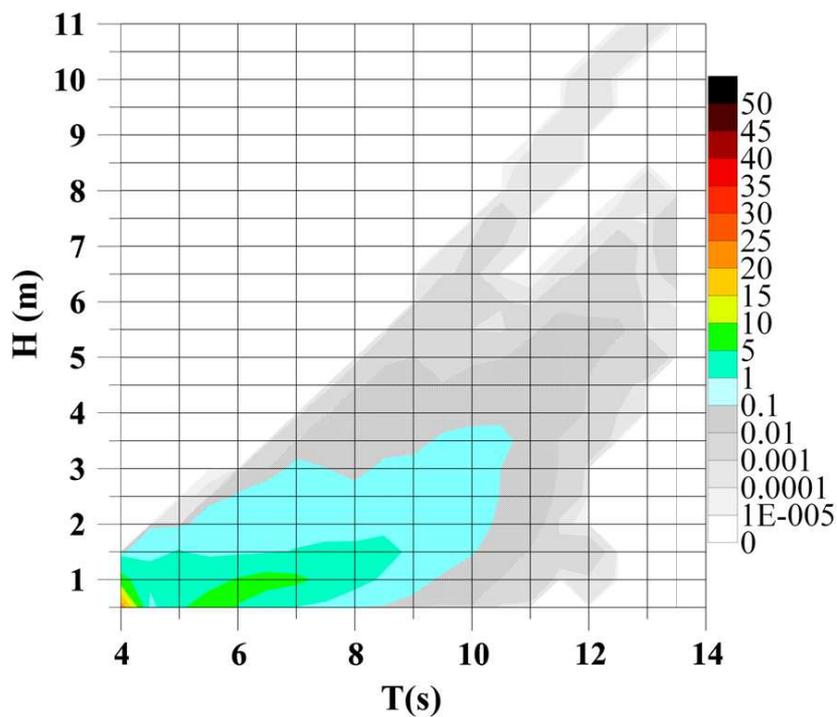
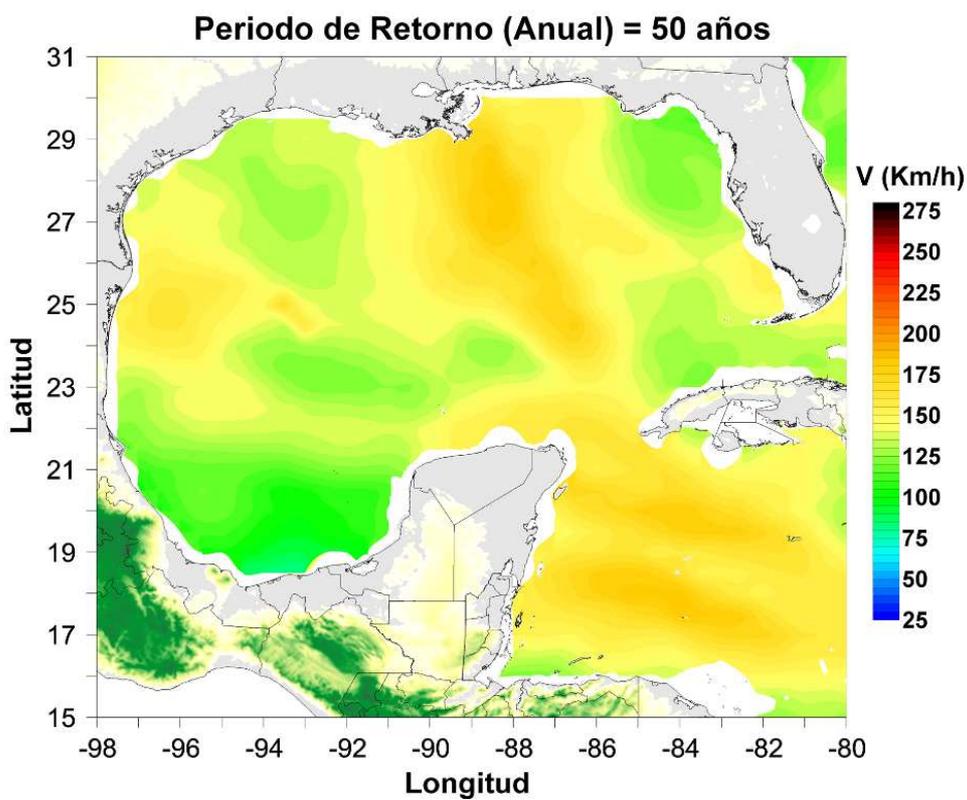


Figura 20. Rosa de oleaje anual Para la celda mas próxima a Cancún, Quintana Roo



**Figura 21.** Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo para la celda mas cercana al puerto de Veracruz, Veracruz



**Figura 22.** Viento con periodo de retorno de 50 años para el Golfo de México

## Productos generados

### Artículos

Se enviaron 4 artículos, para ser sometidos a consideración, al XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, que se desarrollará en Cartagena, Colombia en el mes de septiembre del presente año.

- *Modelación Hidrodinámica del Sistema Lagunar Nichupté, Cancún, México*; Diego Pedrozo Acuña, Gregorio Posada Vanegas, Rodolfo Silva Casarín, Sébastien de BRYE; XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias Colombia, Septiembre 2008.
- *Caracterización Energética de Tormentas en el Golfo de México*, Rivillas Ospina, Germán Daniel, Silva Casarín, Rodolfo, Ruiz Martínez, Gabriel, Posada Vanegas, Gregorio; XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias Colombia, Septiembre 2008.
- *Marea de Tormenta Inducida por Nortes en los Estados de Tabasco y Campeche, México*, Gregorio Posada Vanegas, Rodolfo Silva Casarín, Gabriel Echávez Aldape, Saúl Alonso Miranda, Sébastien de BRYE, Gerardo Palacio Aponte; XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias Colombia, Septiembre 2008.
- *Atlas del Clima Marítimo para las vertientes atlántica y pacífica del litoral Mexicano*, Ruiz Martínez, Gabriel, Silva Casarín, Rodolfo, Rivillas Ospina, Germán Daniel, Posada Vanegas, Gregorio, Pérez Romero, Dulce María, Mendoza Baldwin, Edgar Gerardo; XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias Colombia, Septiembre 2008.

Actualmente se preparan 2 artículos para ser enviados a la Revista Ingeniería Hidráulica en México, uno de estos se describirá el análisis extremal, en el otro el análisis de tormenta, ambos estarán aplicados al Golfo y Pacífico Mexicano, estos artículos se estarán enviando para arbitraje en abril del 2008

### Atlas

Los atlas anteriormente mencionados se publicarán en DVD, el cual irá protegido por Derechos de Autor.

---

Dr. Gregorio Posada Vanegas

---

Dr. Rodolfo Silva Casarín.

## **ANEXO D**

**Informe de actividades  
Julio 2007- febrero 2008  
Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos  
Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México**

**Proyecto Ubicación y Caracterización de Zonas en Peligro de  
Inundación por Marea de Tormenta en las Costas de México  
Clave 00048639**

Gregorio Posada Vanegas y Rodolfo Silva Casarín

### **Bases de datos de huracanes en las costas de México**

#### **Introducción**

Se detallan en este anexo las actividades realizadas por el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del II-UNAM en el proyecto de investigación "*Ubicación y Caracterización de Zonas en Peligro de Inundación por Marea de Tormenta en las Costas de México*", el cual está enmarcado dentro del Fondo Sectorial CNA-CONACYT.

Este anexo trata exclusivamente de la creación de dos bases de datos que permiten conocer que huracanes (con sus características) han influenciado las costas y aguas mexicanas, a continuación se realiza la descripción de estas bases. Se adjunta un Disco Compacto con toda la información aquí mencionada.

#### **Base de datos de huracanes**

#### **Modelo utilizado**

Para crear la base de datos 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)

**Equation Section 1**

La presión atmosférica se modela como

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) \exp\left(\frac{R}{r}\right) \quad (1)$$

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:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_0} - 0.5fR \quad (2)$$

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

$$W = 0.886[F_v U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (3)$$

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  $U_R$  se estima a partir de las siguientes relaciones:

$$F_v = 1 - 0.971 \exp\left[-6.826\left(\frac{r}{R}\right)^{4.798}\right] \quad \frac{r}{R} < 1 \quad (4)$$

$$F_v = \exp\left[A \ln^3\left(\frac{r}{R}\right) \exp\left[B \ln\left(\frac{r}{R}\right)\right]\right] \quad \frac{r}{R} > 1 \quad (5)$$

Donde:

$$A = -0.99[1.066 - \exp(-1.936N_c)] \quad (6)$$

$$B = -0.357[1.4456 - \exp(-5.2388N_c)] \quad (7)$$

En las ecuaciones (6) y (7),  $N_c$  determina el número de Coriolis ciclostrófico,

$$N_c = \frac{fR}{U_r} \quad (8)$$

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.

## Componentes de la base de datos

Se realizaron dos base de datos, una para la vertiente Atlántica y otra para el Pacífico, en cada base se encuentra un archivo que contiene todos los ciclones tropicales que se han presentado desde el año 1848 hasta el 2007, este archivo incluye para cada evento: un número consecutivo, el año en el que se originó, la máxima categoría a la que llegó (depresión tropical equivale a 1, huracán clase V equivale a 7) y el nombre; para el Atlántico se contabilizan 1380 eventos, para el pacífico 838.

Se creó otro archivo en formato \*.RAR que contiene los avisos normalizados para cada ciclón. En la Tabla 2 se indican los componentes de cada archivo, en la Figura 23 se muestra la información contenida en el archivo P0838.DAT último evento de la vertiente pacífica

Columna	Descripción
A	No Consecutivo
B	Número de ciclón en el año
C	Año
D	Mes
E	Día
F	Hora
G	Latitud
H	Longitud
I	Velocidad del viento
J	Presión central
K	Velocidad de desplazamiento
L	Dirección de desplazamiento
M	Escala de intensidad
N	Número de aviso
O	Nombre

**Tabla 2. Descripción de los archivos contenidos en Avisos\_normalizados\_Atlantico.rar y Avisos\_Normalizados\_Pacifico.rar**

Primer reporte de avance del proyecto de fondos mixtos CNA-CONACYT "CNA-2006-01-48639"

F4		18															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	838	19	2007	10	15	3	15	-108.5	55.59	1003	0	0	1	1	Tropical	S	
2	838	19	2007	10	15	0	14.9	-108.5	64.86	1000	1.85	180.65	2	2	Tropical	S	
3	838	19	2007	10	15	12	15.1	-108.9	55.59	1000	8.1	62.9	1	3	Tropical	S	
4	838	19	2007	10	15	18	15.1	-108.7	55.59	1000	3.58	270	1	4	Tropical	S	
5	838	19	2007	10	16	0	14.7	-109	55.59	1000	9.09	144.26	1	5	Tropical	S	
6	838	19	2007	10	16	6	14.4	-108.9	55.59	1000	5.83	198.45	1	6	Tropical	S	
7	838	19	2007	10	16	12	14.2	-108.5	64.86	1000	8.12	242.97	2	7	Tropical	S	
8	838	19	2007	10	16	18	14.1	-108.1	55.59	1000	7.45	255.67	1	8	Tropical	S	
9	838	19	2007	10	17	0	14	-107.5	55.59	1000	10.92	260.27	1	9	Tropical	S	
10	838	19	2007	10	17	6	14.2	-107.3	64.86	1000	5.18	315.4	2	10	Tropical	S	
11	838	19	2007	10	17	12	14.6	-107.1	64.86	1000	8.24	333.58	2	11	Tropical	S	
12	838	19	2007	10	17	18	14.5	-105.6	64.86	1000	26.99	266.08	2	12	Tropical	S	
13	838	19	2007	10	18	0	14.7	-104.9	64.86	1000	13.1	286.35	2	13	Tropical	S	
14	838	19	2007	10	18	6	15.1	-104.3	64.86	1000	13.03	304.46	2	14	Tropical	S	
15	838	19	2007	10	18	12	16.2	-103.5	64.86	1000	24.75	325.03	2	15	Tropical	S	
16	838	19	2007	10	18	18	16.6	-103.7	64.86	1000	8.21	26.08	2	16	Tropical	S	
17	838	19	2007	10	19	0	16.6	-104.4	64.86	1000	12.45	90	2	17	Tropical	S	
18	838	19	2007	10	19	6	16.6	-104.8	64.86	1000	7.11	90	2	18	Tropical	S	
19	838	19	2007	10	19	12	16.9	-105	74.12	1000	6.58	32.73	2	19	Tropical	S	
20	838	19	2007	10	19	18	17.5	-105.5	83.39	1000	14.16	38.65	2	20	Tropical	S	
21	838	19	2007	10	20	0	17.7	-105.9	83.39	1000	7.97	62.42	2	21	Tropical	S	
22	838	19	2007	10	20	6	17.7	-106.1	92.65	1000	3.54	90	2	22	Tropical	S	
23	838	19	2007	10	20	12	17.9	-106.4	101.92	1000	6.44	55.04	2	23	Tropical	S	
24	838	19	2007	10	20	18	18.3	-106.8	111.18	1000	10.16	43.46	2	24	Tropical	S	
25	838	19	2007	10	21	0	18.9	-107.2	111.18	1000	13.05	31.99	2	25	Tropical	S	
26	838	19	2007	10	21	6	19.3	-107.3	111.18	1000	7.57	12.67	2	26	Tropical	S	
27	838	19	2007	10	21	12	19.3	-107.4	92.65	1000	1.75	90	2	27	Tropical	S	
28	838	19	2007	10	21	18	19.4	-107.6	83.39	1000	3.94	62.04	2	28	Tropical	S	
29	838	19	2007	10	22	0	19.6	-108	74.12	1000	7.89	62.09	2	29	Tropical	S	
30	838	19	2007	10	22	6	19.6	-108.1	74.12	1000	1.75	90	2	30	Tropical	S	
31	838	19	2007	10	22	12	19.7	-108.9	64.86	1000	14.14	82.5	2	31	Tropical	S	
32	838	19	2007	10	22	18	19.5	-109.4	55.59	1000	9.45	112.98	1	32	Tropical	S	
33	838	19	2007	10	23	0	19.4	-110.4	55.59	1000	17.58	96.02	1	33	Tropical	S	
34	838	19	2007	10	23	6	19.1	-111.7	55.59	1000	23.43	103.66	1	34	Tropical	S	
35	838	19	2007	10	23	12	18.7	-112.5	46.33	1000	15.9	117.64	1	35	Tropical	S	
36	838	19	2007	10	23	18	18.3	-113.8	46.33	1000	24.13	107.81	1	36	Tropical	S	
37																	

Figura 23. Imagen del archivo P0838.dat

La base de datos se complementa con un archivo en formato RAR que contiene la influencia de cada uno de los huracanes que componen la base de datos en celdas de 0.5 por 0.5 grados. La Tabla 3 presenta las características de cada archivo. Para el Atlántico se consideraron 817 celdas, para el Pacífico 1170

Columna	Descripción
A	Año
B	Mes
C	Día
D	Hora
E	Vel del viento (km/h)
F	Vel del viento (m/s)
G	Dirección del viento
H	Presión atmosférica local (mb)
I, J	Nombre

Tabla 3. Descripción de los archivos contenidos en Atlantico\_Puntos.rar y Pacifico\_Puntos.rar

La Figura 24 presenta la información correspondiente al archivo GA26600275.DAT de la vertiente Atlántica, cual corresponde a la celda que tiene coordenadas -93.50 Longitud y 27.50 latitud, en los archivos Malla.TXT y MallaP.txt se encuentran todas las celdas analizadas. Para conformar el nombre del archivo se debe sumar 360 a la longitud.

A1	#								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1783	1973	9	6	13	56.8	15.8	360	1002	DELIA
1784	1973	9	6	14	53	14.7	360	1003	DELIA
1785	1973	9	6	15	52.7	14.7	360	1003	DELIA
1786	1973	9	6	16	52.4	14.6	360	1003	DELIA
1787	#								
1788	1974	9	6	12	111.9	31.1	360	970	CARMEN
1789	1974	9	6	13	111.8	31.1	360	970	CARMEN
1790	1974	9	6	14	111.8	31.1	360	970	CARMEN
1791	1974	9	6	15	113.3	31.5	360	969	CARMEN
1792	1974	9	6	16	113.3	31.5	360	969	CARMEN
1793	1974	9	6	17	113.3	31.5	360	969	CARMEN
1794	1974	9	6	18	114.3	31.8	360	968	CARMEN
1795	1974	9	6	19	115.3	32	360	967	CARMEN
1796	1974	9	6	20	114.9	31.9	360	967	CARMEN
1797	1974	9	6	21	115.9	32.2	360	966	CARMEN
1798	1974	9	6	22	116.9	32.5	360	965	CARMEN
1799	1974	9	6	23	116.5	32.4	360	965	CARMEN
1800	1974	9	7	0	116.3	32.3	360	965	CARMEN
1801	1974	9	7	1	116.2	32.3	360	965	CARMEN
1802	1974	9	7	2	114.6	31.8	360	966	CARMEN
1803	1974	9	7	3	114.4	31.8	360	966	CARMEN
1804	1974	9	7	4	114.3	31.7	360	966	CARMEN
1805	1974	9	7	5	112.7	31.3	360	967	CARMEN
1806	1974	9	7	6	115.2	32	360	965	CARMEN
1807	1974	9	7	7	117.7	32.7	360	963	CARMEN
1808	1974	9	7	8	120.1	33.4	360	961	CARMEN

Figura 24. Imagen del archivo GA26600275.DAT

## Bibliografía

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

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

**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.

## **ANEXO E**

### **Elaboración de un SIG y de una página WEB**

#### **INFORME DE ACTIVIDADES ENERO A ABRIL DE 2008**

CENTRO EPOMEX – ÁREA DE PROCESOS COSTEROS  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CAMPECHE

Elaborado por: Gerardo Palacio, Ramón Zetina, Claudia Monzón

Proyecto: **UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZONAS EN PELIGRO DE INUNDACIÓN POR MAREA DE TORMENTA EN LAS COSTAS DE MÉXICO CLAVE 00048639**

Las actividades realizadas en este periodo fueron orientadas hacia la revisión de la información base, tanto de las imágenes Quickbird como de los modelos de elevación digital. A su vez, se exploraron distintos métodos automatizados para la extracción de la línea de costa y la clasificación de la cubierta vegetal a fin de separar la interfase marina y continental para su posterior análisis. Uno de los productos de este periodo de trabajo es el desarrollo de una interfase en html para el manejo del contenido general del proyecto así como de los productos generados.

#### **1. REVISIÓN DE LAS IMÁGENES QUICK BIRD**

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 reprojectado 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

Existen 16 ciudades en las que se podría trabajar ya que se cuenta con la información de las imágenes y la información topográfica. No obstante en tres de estas ciudades, Cancún, Lázaro Cárdenas y Progreso se presentan problemas con la fuente de información. En el primer caso la imagen QuickBird no puede ser desplegada en ArcMap por lo que se utilizará otro programa para su procesamiento (ArcView). Para las otras dos ciudades los modelos digitales del terreno presentan errores de interpolación entre las cotas entre 5 y 20 metros.

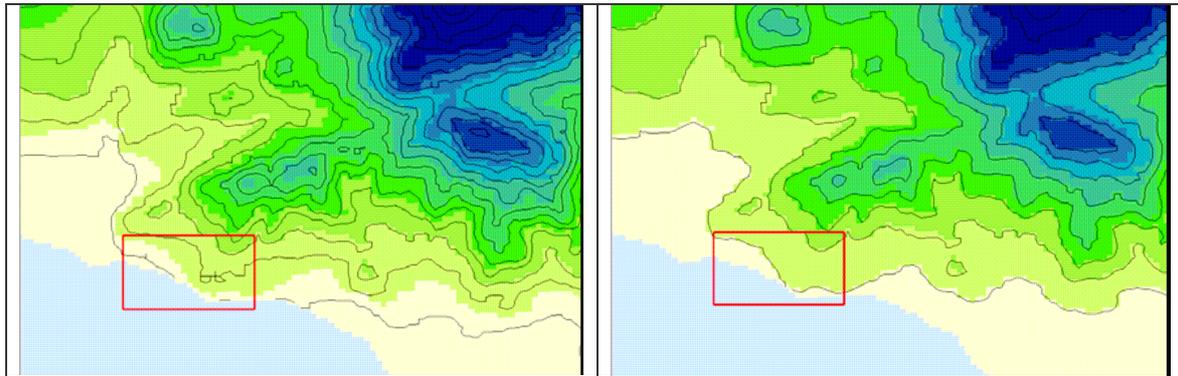
En estados como Tamaulipas se cuenta con dos posibles ciudades en donde hacer el análisis, Altamira y Tampico. No obstante, en la segunda ciudad existe un problema con el MDT por lo que se trabajaría con Altamira. No contamos con imágenes QuickBird para algunas ciudades como Tepic, donde se había considerado trabajar inicialmente.

Al revisar las imágenes de Cancún, se detectó un error en la fuente. No se pueden desplegar en ArcMap. Si se pueden desplegar en Arcview 3.2

Corregir DEM de Progreso y Lázaro Cárdenas. Utilizar los SRMT de esas ciudades para corregir el DEM.

## 2. 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.



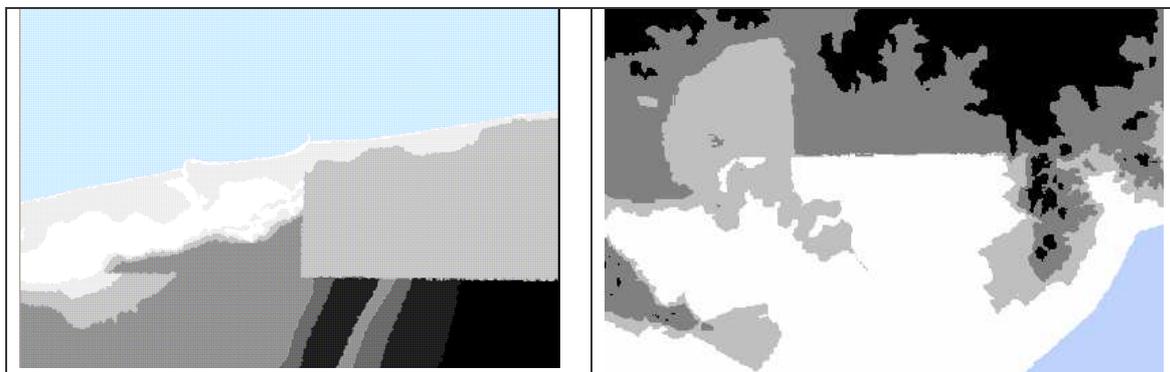
Curvas cada 20 metros

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.



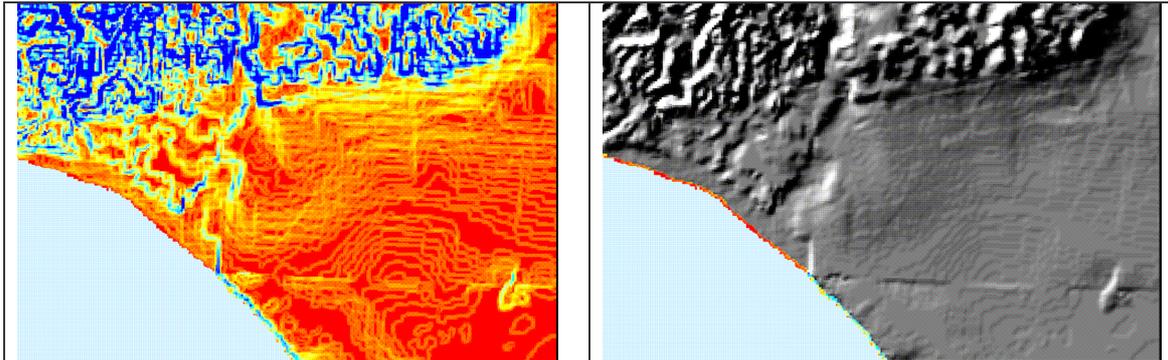
PUERTO PROGRESO, YUCATÁN

LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN

**FIGURA 2.** Irregularidades del modelo de elevación digital identificadas

### 3. 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

### 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

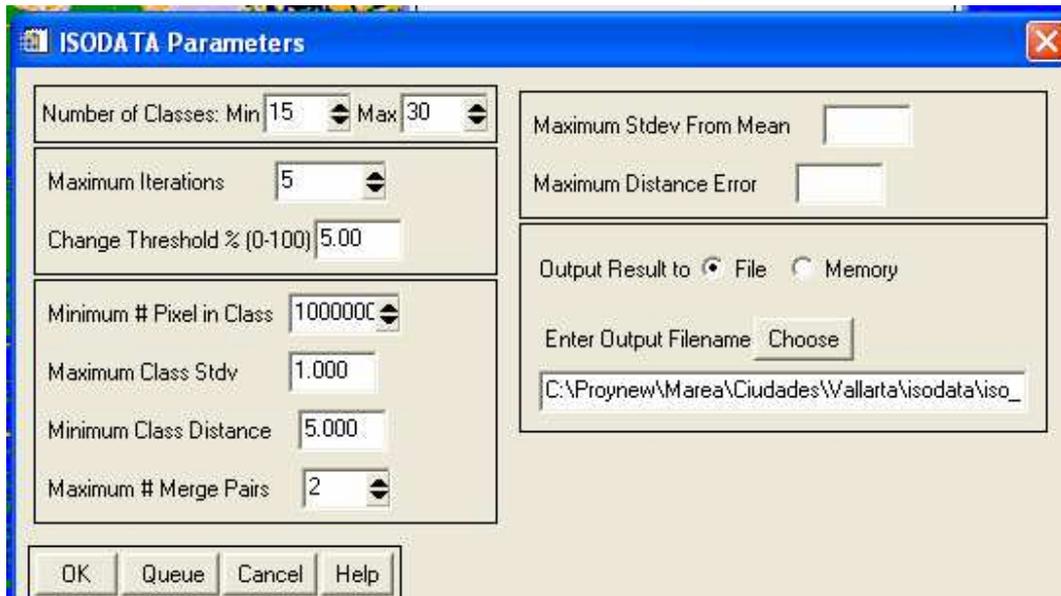
Extracción automatizada

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

## 5. 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) correctamente y sin mucha confusión el agua de la tierra. 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. Con estos dos comandos se reduce el efecto conocido como "sal y pimienta"

Fase 1

Fase 2

Fase 3



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

## 6. PROCESOS PENDIENTES

Las actividades realizadas al momento están orientadas a la integración de un sistema de información geográfico para cada ciudad, el cual estará compuesto por los siguientes elementos:

- Imágenes Quickbird en formato JP2000
- Corte del modelo de elevación digital INEGI re proyectado a coordenadas UTM, datum WGS84 para cada ciudad
- Mapa de geomorfología del terreno: cobertura de pendientes en grados (con tamaño de celda de 24m) e interpretación de la geometría de las geoformas costeras.
- La línea de costa de las ciudades consideradas en el estudio
- Mapa de cubierta vegetal y coeficientes de escurrimiento asociados.
- Índice de antropización por ciudad y su tipificación según la vocación económica en: ciudades turísticas (alto y bajo impacto), industriales, comerciales, etc.

Al mismo tiempo se establecerá la metodología para elaborar de forma sistemática los mapas de predisposición dinámica del relieve que incluirá elementos morfométricos, morfográficos y de susceptibilidad a la infiltración o al escurrimiento. Es importante realizar los análisis de la identificación del tipo de cubierta del suelo ya que las perturbaciones producidas por el hombre como los cambios de uso de suelo y cobertura, contaminación del aire, agua y suelo, y la pérdida de superficies productivas y biodiversidad están incrementando la presión

sobre la productividad y salud de los ecosistemas a nivel local, regional y global (Wali et al., 1999; Evrendilek and Ertekin, 2002; Evrendilek, 2004).

## 7. PRODUCTOS GENERADOS

Se diseñó la primera propuesta de una interfase en formato html (web) para la organización, manejo y difusión de los datos generales y los productos del proyecto. Con la integración de los datos generales y productos en esta interfase el usuario tendrá acceso cada uno de los componentes del proyecto, a la vez que le permitirá la exploración en cualquier PC. La información contenida en cada apartado se actualizará en medida que se integren los datos:

Memoria técnica de los procedimientos de análisis espacial

Modelos numéricos y espaciales por ciudad

Metadatos

Cartografía analítica y sintética



Página de Inicio Antecedentes Justificación **Objetivos del Proyecto** Metodología Productos Proyectos Relacionados Cronograma Muestras de Productos

 Ubicación y Caracterización de Zonas en Peligro por Marea de Tormenta en las Costas de México

**SIG** Sistema de Información Geográfica

Participantes:

## **ANEXO F**

### **Administración**

#### **1.- Apoyo académico a un Posdoctorado**

Se dio de alta un pos-doctorado el Dr. Gregorio Posada Vanegas, que ya se incorporó al grupo para trabajar con la batimetría y la topografía

El Dr. Gregorio Posada Vanegas se encargará de:

- Obtención y adecuación de batimetría para las zonas a analizar a detalle.
- Modelación hidrodinámica de ciclones tropicales.
- Obtención de zonas de inundación para el litoral mexicano con diferentes periodos de retorno.
- Participación en el desarrollo de un Sistema de Información Geográfico.
- Realización de los informes parciales.

El periodo de participación del Dr. Posada comprende del 06 de julio de 2007 al 30 de junio de 2008.

En un cambio reciente, el Dr. Posada deja de ser pos-doctorado el 1 de febrero de 2008 aunque continúa participando en el desarrollo técnico del proyecto.

#### **2.- Lista de Participantes**

Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos, Instituto de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México.

Dr. Rodolfo Silva Casarín; Dr. Gregorio Posada Vanegas; Dr. Gustavo Bautista Godínez.

Subcoordinación de hidrometeorología.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Dr. Saúl Miranda Alonso; M. en C. José Luis Pérez.

Centro de Investigaciones Avanzadas, IPN, Unidad Mérida.

Dr. Ismael Mariño Tapia; Dr. Cecilia Enríquez Ortiz.

Universidad Autónoma de Campeche.

M. en C. Álvaro Gerardo Palacio Aponte.

### **3.- SIG y página WEB**

En diciembre 2008, se transfirió \$160,000.00 a la UACAMP para que inicie el programa SIG y página WEB que asimile la información. Anexo E

### **4.- Convenios firmados y anexos técnicos**

#### **1.- UNAM-Instituto de Ingeniería y el IMTA**

El monto total del presente Convenio de Colaboración es de **\$317,500.00 (TRESCIENTOS DIECISIETE MIL QUINIENTOS PESOS 00/100 M.N.)**, para la realización de los trabajos citados en la Cláusula Primera del presente instrumento.

#### **“Anexo técnico I”**

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

##### **Objetivo General**

Identificar y caracterizar zonas costeras en peligro de inundación por marea de tormenta. Determinar un conjunto de envolventes de trayectorias de ciclones, históricas y generadas numéricamente, para implementar un sistema capaz de simular escenarios de inundación costera asociados a una probabilidad de ocurrencia.

##### **Objetivos específicos**

- Desarrollar e implementar un sistema de cómputo que integre las ecuaciones de flujo somero promediadas en la vertical, para estimar la marea de tormenta generada por un huracán, así como sus corrientes asociadas.
- Estimar las cotas de inundación asociadas a diferentes periodos de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años) para las localidades de mayor interés nacional, buscando contar con elementos sólidos que coadyuven al desarrollo de planes de ordenamiento territorial social, económica y ambientalmente favorables.
- Modelar experimentalmente, en caso necesario, sistemas que permitan mitigar los efectos inducidos por la marea de tormenta.

##### **Cronograma de actividades**

Primera etapa, del 15/05/2007 al 30/06/2007.-

- Inicio del proceso administrativo para la adquisición de los insumos necesarios para el desarrollo del trabajo de investigación.
- Organización de actividades coordinadas con las demás instituciones participantes en el proyecto.
- Re-acondicionamiento del modelo numérico de marea de tormenta con esquema de inundación y secado de celdas para que este pueda estar integrado en el SIG
- Generación de una base de datos que incluya las posibles trayectorias de huracanes que afecten a la costa mexicana basada tanto en eventos históricos como sintéticos.
- Captura y digitalización de la batimetría y topografía de las costas de México.

Segunda etapa del 01/07/2007 al 30/08/2009.-

- Caracterización de tipos de suelo en las zonas costeras para cuantificar el coeficiente de fricción de fondo
- Capacitación y adiestramiento en el uso del modelo numérico a las partes que realizarán la modelación de marea de tormenta.
- Implementación y validación del modelo numérico para cada una de las regiones de la republica mexicana que serán modeladas.
- Modelación de eventos históricos de huracanes y análisis de los resultados
- Modelación de casos sintéticos de huracanes y análisis de los resultados

## **2.- Convenio modificatorio al convenio de colaboración entre Inng-UNAM y el IMTA**

- a) La cantidad de **\$300,000.00 (TRESCIENTOS MIL PESOS 00/100 M. N.)**, contra entrega del primer informe de avance.
- b) La cantidad de **\$17,500.00 (DIECISIETE MIL QUINIENTOS PESOS 00/100 M.N.)** a la entrega del segundo informe de avance.
- c) La cantidad de **\$110,000.00 (CIENTO DIEZ MIL PESOS 00/100 M. N.)**, contra entrega del tercer informe de avance.
- d) La cantidad de **\$40,000.00 (CUARENTA MIL PESOS 00/100 M.N.)** a la entrega del cuarto y último informe.

### **“Anexo técnico II”**

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

## **Procesamiento de información batimétrica y topográfica.**

### **Objetivo General**

Procesar la información topográfica y batimétrica necesaria para la adecuada implementación del Sistema de Información Geográfica y del modelo numérico de modelación de marea de tormenta.

### **Objetivos específicos**

- Procesar la información batimétrica general (golfo de México y Océano Pacífico) y de detalle, para 25 ciudades costeras del litoral Mexicano.
- Procesar la información topográfica de la línea de costa de ambos litorales mexicanos, al igual que la topografía de detalle (hasta la cota 10 m) de 25 ciudades costeras.

### **Cronograma de Actividades Instituto de Ingeniería, UNAM**

#### **Primer año**

- Inicio de la captura y digitalización de la batimetría y topografía de las costas de México, al igual que de 25 ciudades costeras.

#### **Segundo año**

- Finalización de la digitalización de la batimetría y topografía de las costas de México

### **3.- Convenio específico de colaboración que celebran por una parte la Universidad Autónoma de Campeche y el IMTA**

El monto total del presente Convenio de Colaboración es de **\$180,000.00 (CIENTO OCHENTA MIL PESOS 00/100 M.N.)**, para la realización de los trabajos citados en la Cláusula Primera del presente instrumento.

### **“Anexo técnico III”**

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

## **Objetivo General**

Caracterizar la susceptibilidad de terreno costero ante las inundaciones extraordinarias ocasionadas por marea de tormenta e integrar los modelos numéricos predictivos de su comportamiento en un Sistema de Información Geográfica.

## **Objetivos específicos**

- Caracterizar las unidades de terreno costero y diferenciar su respuesta hidrogeomorfológica ante las inundaciones por marea de tormenta, considerando su morfogénesis y morfodinámica.
- Diferenciar las expresiones espaciales (puntuales, lineales, y areales) de inundación asociadas a diferentes periodos de retorno (10, 25, 50, 100 y 500 años) para las localidades de mayor interés nacional.
- Diseñar un Sistema de Información Geográfica, a través del cual se pueda acceder a la información ponderada de las zonas inundables por marea de tormenta.

## **Cronograma de actividades**

Primera etapa, del 15/05/2007 al 30/06/2007.-

- Inicio del proceso administrativo para la adquisición de los insumos necesarios para el desarrollo del trabajo de investigación.
- Organización de actividades coordinadas con las demás instituciones participantes en el proyecto.
- Generación del modelo conceptual de susceptibilidad para la generación de coberturas geográficas analíticas para su modelado espacial en un SIG.
- Captura y digitalización de la batimetría y topografía de las costas de México.

Segunda etapa del 01/07/2007 al 30/08/2009.-

- Caracterización de tipos de cobertura de suelo en las zonas costeras para cuantificar el coeficiente de escurrimiento y su relación con la morfogénesis y morfometría de las unidades del terreno costero.
- Modelación espacial de eventos históricos de huracanes y análisis de los resultados y diseño del SIG y hoja WEB con software plataforma libre.
- Modelación espacial de casos sintéticos de huracanes y análisis de los resultados y diseño del SIG y hoja WEB con software plataforma libre.