

PROYECTO INTERNO

DESARROLLO DE UN MODELO FÍSICO Y NUMÉRICO PARA EL
ESTUDIO DEL IMPACTO DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS PARA LA
PROTECCIÓN DE LA ZONA DE COSTERA

HC1413.1

COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA

Diciembre 2014

Contenido

Resumen	5
Introducción	6
Objetivos	7
Resultados esperados	7
Modelación física	7
Proyecto ejecutivo del modelo físico.	12
Características de las estructuras sumergidas	15
Características del sistema de generación de oleaje.	17
Sistema de medición de oleaje	18
Construcción del modelo físico.	19
Modelaciones físicas bajo diferentes condiciones ambientales.	27
Modelación Numérica	28
Modelo numérico Delft3D.	28
Generación de malla numérica y configuración del modelo numérico (Flow3D).	32
Modelación de escenario de estructuras sumergidas.	33
Análisis de resultados	35
Conclusiones y recomendaciones	36
Referencias	37

Lista de Figuras

Fig. 1. Tipos de estructuras sumergidas (LCS) en Europa (De Lamberti et al., 2005).	6
Fig. 2. Tanque experimental de la ESIA-Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.	8
Fig. 3. Área de control de los modelos físicos del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte.	9
Fig. 4. Tanque de oleaje del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte.	9
Fig. 5. Sistema de medición de oleaje del tanque del Instituto Mexicano del Transporte.	10
Fig. 6. Generador de oleaje del tanque del Instituto Mexicano del Transporte.	10
Fig. 7. Tanque experimental del laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos.	11
Fig. 8. Canal de oleaje del laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos.	11
Fig. 9. Materiales utilizados para las pruebas experimentales del laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos.	12
Fig. 10. Diagrama general de la distribución del canal.	13
Fig. 11. Vista lateral del canal de oleaje.	13
Fig. 12. Vista de planta con las dimensiones del canal de oleaje.	14
Fig. 13. Contenedor relleno de grava para amortiguar la reflexión del oleaje.	15
Fig. 14. Geometría de la estructura sumergida con cresta angosta.	16
Fig. 15. Geometría de la estructura sumergida con cresta angosta.	16
Fig. 16. Sistema de generación de oleaje.	18
Fig. 17. Sensor de oleaje.	19
Fig. 18. Características finales del tanque de oleaje.	20
Fig. 19. Proceso de demolición de estructuras existentes en el área de adecuación del tanque de oleaje.	22
Fig. 20. Proceso de demolición de estructuras existentes e inicio de del basamento del tanque de oleaje.	23
Fig. 21. Proceso de construcción del basamento del tanque de oleaje.	24
Fig. 22. Proceso de construcción del colado del basamento del tanque de oleaje.	25
Fig. 23. Proceso de construcción de las paredes del tanque de oleaje.	26
Fig. 24. Proceso de terminación y pintura del tanque de oleaje.	27
Fig. 25. Definición del nivel (ζ), profundidad (d) y profundidad total (H).	29
Fig. 26. Sistema de coordenadas en la vertical. Coordenadas sigma (izquierda) y nivel-Z (derecha).	29
Fig. 27. Generación de malla numérica y profundidad de zona costera.	32
Fig. 28. Puntos de monitoreo dentro del área de modelación.	33

Fig. 29. Altura de ola significativa modelada para la zona costera.....	33
Fig. 30. Puntos de monitoreo dentro del área de modelación.	34
Fig. 31. Elevación del nivel inducido por el oleaje arribando a la costa y vectores de corrientes en el área cercana a las estructuras sumergidas.	34
Fig. 32. Modelación numérica de la erosión/depositación de sedimentos en la zona costera protegidas con estructuras sumergidas.	35

Resumen

Con motivo de la problemática de la erosión costera en las playas y con la finalidad de establecer formas de mitigación se desarrolló un modelo físico e implementó un modelo numérico para investigar los procesos que determinan la dinámica costera. En la primera parte del informe se describen las características generales del tanque de oleaje para el estudio de estructuras sumergidas. El modelo físico del tanque se puede considerar en tres partes que consisten en la estructura del tanque, el generador de oleaje y el sistema de medición de oleaje. Para el tanque se describen sus dimensiones y la distribución que este tendrá para la instalación de las estructuras sumergidas. Para el sistema de generación de oleaje se está considerando una placa modulada por un motor para generar oleaje con diferentes características. Para la medición se considera un sistema que permita evaluar la altura y periodo del oleaje en puntos (mínimo 3) alrededor de la estructura sumergida.

Adicional al modelos físico se implementó el modelo numérico Delft3D desarrollado por el grupo Deltares de los Países Bajos. El modelo Delft3D es un modelo tridimensional que modela en la horizontal en coordenadas cartesianas o curvilíneas y en la vertical con coordenadas Z o sigma. Incorpora los procesos físicos de mareas, oleaje y transporte de sedimentos. El modelo es versátil y se implementa para modelar un escenario de una zona costeras de aproximadamente 10-20 km a lo largo de la costa y 5-10 km mar adentro. Escenarios de la transformación del oleaje por el efecto de estructuras sumergidas es modelado, así como, el efecto en el transporte de sedimentos. El modelo Delft3D mostro ser muy versátil y capaz de modelar escenarios costeros con condiciones de oleaje, sedimentos y corrientes, asimismo, puede incorporar muy fácilmente estructuras sumergidas que inhiban la transferencia de energía hacia la costa. Se estudia un escenario pero existe la capacidad de generar los escenarios que sean necesarios para el estudio de la dinámica costera.

Introducción

Uno de los principales problemas de la zona costera es la erosión de la línea de playa. Este es un problema generalizado en diferentes partes del mundo y, consecuentemente, en la república mexicana, tal como se ha observado en las playas de Quintana Roo (Cancún y Playa del Carmen), Yucatán y Campeche. Una alternativa de mitigación y de estabilización de las playas es la construcción de estructuras que permitan mitigar la erosión costera. En la Fig. 1 se muestra el porcentaje y tipo de estructuras que mundialmente se han utilizado para inhibir la erosión costera modificando las corrientes y energía del oleaje y, por lo tanto, permitiendo la acreción de arena. Con base a esto se implementará un modelo físico y numérico que permita establecer la dinámica de estas estructuras y ofrecer soluciones tangibles para el proceso de erosión costera.

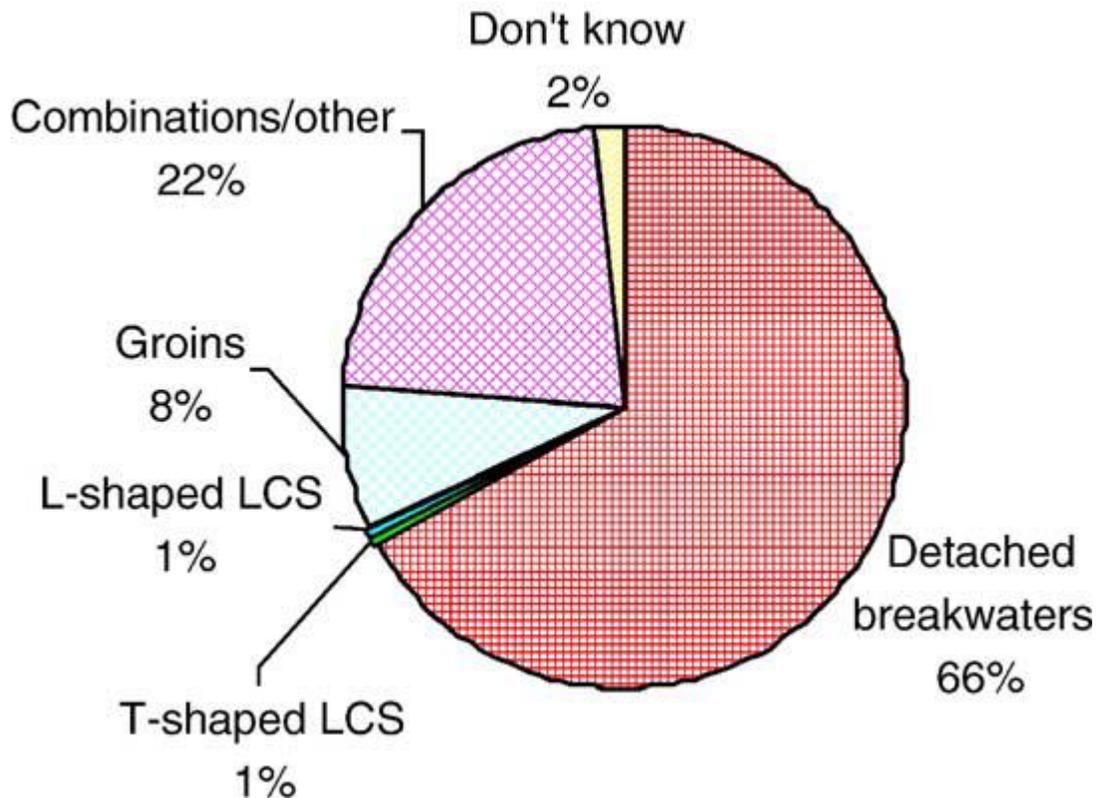


Fig. 1. Tipos de estructuras sumergidas (LCS) en Europa (De Lamberti et al., 2005).

Objetivos

Desarrollo de un modelo físico y numérico para el estudio de diferentes escenarios de estructuras sumergidas en la protección de la zona costera.

Resultados esperados

Modelo físico de laboratorio para la modelación de diferentes escenarios de estructuras sumergidas.

Modelo numérico que sintetice los resultados de laboratorio y observaciones de campo.

Modelación física

Para la modelación física se llevó a cabo una revisión de los modelos existentes para aprovechar las experiencias que existen tanto en México como en otros laboratorios del mundo. Un ejemplo en México de los laboratorios que han consolidado desarrollos y experiencia en modelos físicos son: el IMTA, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Asimismo, en el extranjero existe un gran número de laboratorios en hidráulica que han desarrollado modelos físicos muy sofisticados en diseño e instrumentación. Con el fin de conocer las características de uno de estos laboratorios se visitó el laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos en donde el modelo que actualmente se está desarrollando es a escala oceánica.

En la Fig. 2 se presenta el tanque de la ESIA-Zacatenco en cual en su momento se estaba desarrollando un estudio del puerto de Salina Cruz. En la figura se puede observar las dimensiones del tanque y las características de la obra en estudio. En la Fig. 3 se presenta el área de control de los modelos físicos del IMT. Debido a las características de los modelos se requiere de un sistema computarizado para la generación del oleaje y medición en diferentes puntos de observación del modelo físico.



Fig. 2. Tanque experimental de la ESIA-Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional.

En la Fig. 4 se presenta uno de los tanques de oleaje con que cuenta el IMT para estudios de sedimentación. En este caso en particular el estudio corresponde a la sedimentación de la bahía de Puerto Márquez, Guerrero. En la Fig. 5 se presenta el sistema de monitoreo del oleaje del modelo físico. El sistema monitorea el arribo del oleaje y los datos son almacenados en el sistema de cómputo que se encuentra en el área de control. Finalmente, en la Fig. 6 se presenta se presenta el generador de oleaje del modelos físico. Este sistema es de tipo pistón y es considerado como el óptimo para la generación de oleaje. El sistema está integrado a un sistema computarizado para generar oleaje con diferentes alturas y periodo.

Para conocer las experiencias de modelos físicos en el extranjero se llevó a cabo una visita al laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos (Fig. 7 a Fig. 9). Los experimentos que se llevan a cabo en el laboratorio de hidráulica son diversos y algunos están enfocados



Fig. 3. Área de control de los modelos físicos del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte.



Fig. 4. Tanque de oleaje del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano del Transporte.



Fig. 5. Sistema de medición de oleaje del tanque del Instituto Mexicano del Transporte.



Fig. 6. Generador de oleaje del tanque del Instituto Mexicano del Transporte.



Fig. 7. Tanque experimental del laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos.

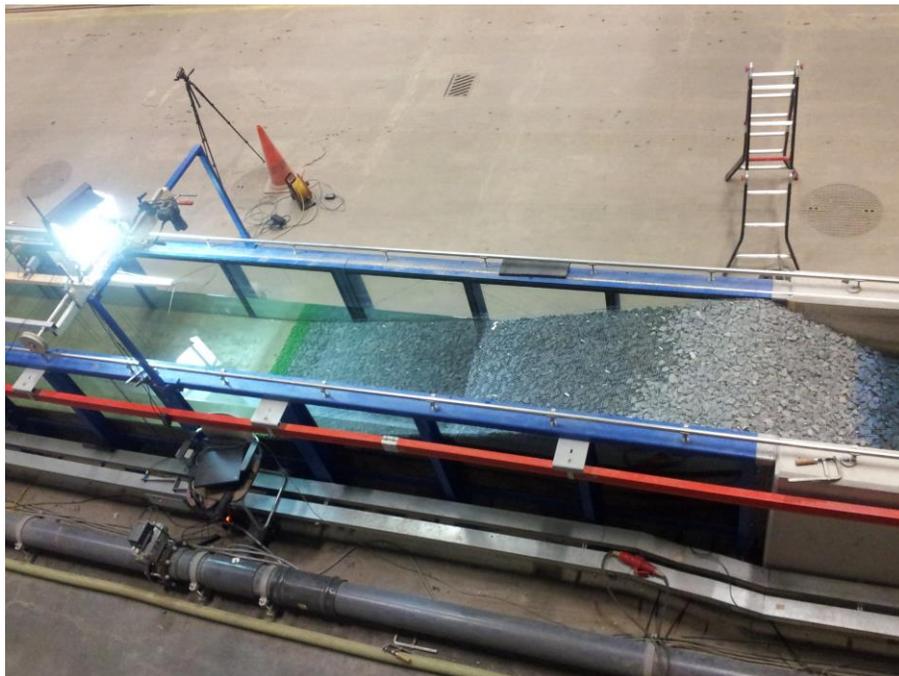


Fig. 8. Canal de oleaje del laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos.



Fig. 9. Materiales utilizados para las pruebas experimentales del laboratorio de hidráulica de Deltares en los Países Bajos.

Proyecto ejecutivo del modelo físico.

Con la finalidad de estudiar la estabilidad de estructuras sumergidas y su impacto en el transporte de sedimentos se construirá un tanque de oleaje que permita simular a escala la dinámica de este proceso. El canal de oleaje tendrá las siguientes características. Es un canal rectangular con dimensiones 17.85 m x 11.95 m. En su parte angosta en un extremo estará ubicado el generador de oleaje y en la parte opuesta la playa. En la parte intermedia se ubicará la estructura sumergida cuyas dimensiones serán variables en longitud y ancho de acuerdo a cada uno de los experimentos que se lleve a cabo (Fig. 1, 2 y 3). En los costados del canal se ubicaran paredes que puedan amortiguar la reflexión del oleaje hechos de contenedores de malla, e.g., ciclónica de 1.21 m x 1.21 m) llenos de rocas de aproximadamente 5 cm de diámetro llenados hasta una altura de 0.70 m (Fig. 4). Las áreas adyacentes a los amortiguadores se dejarán vacías. La zona de playa estará conformada por roca (grava) de 1.5 cm de diámetro.

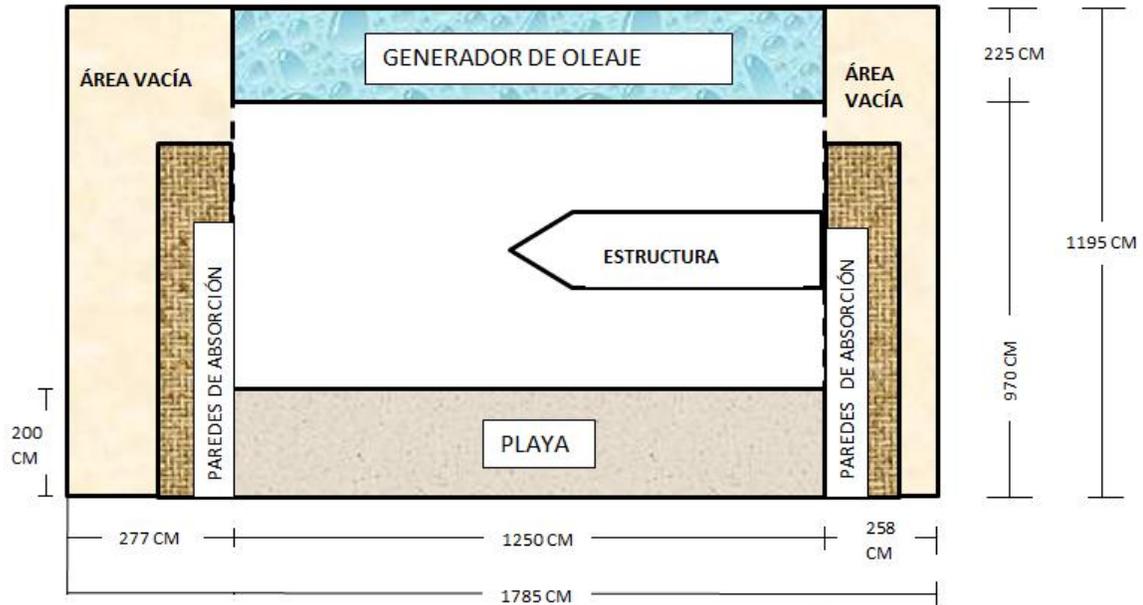


Fig. 10. Diagrama general de la distribución del canal.

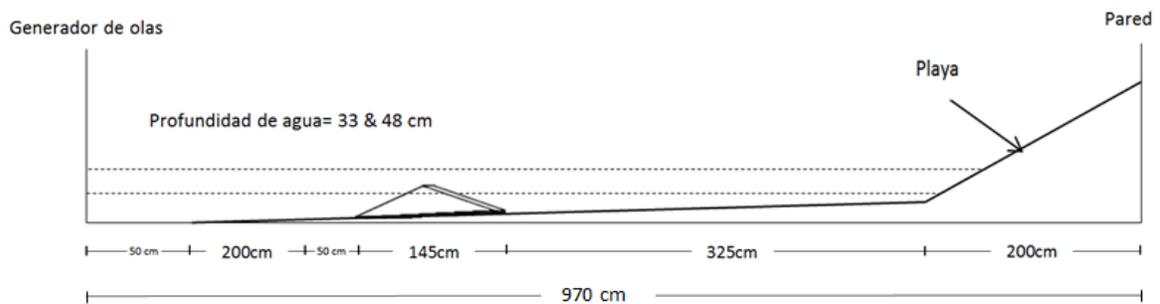


Fig. 11. Vista lateral del canal de oleaje

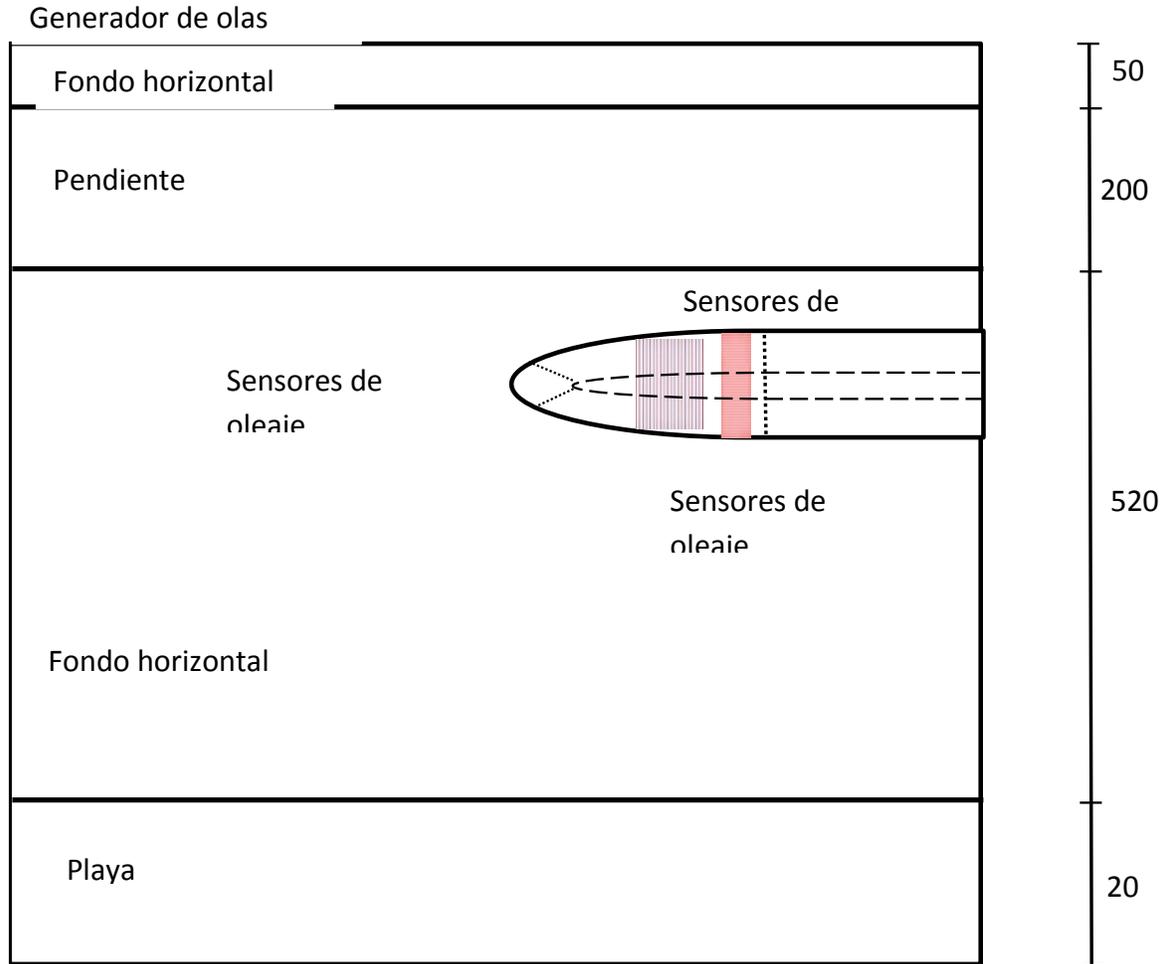


Fig. 12. Vista de planta con las dimensiones del canal de oleaje.



Fig. 13. Contenedor relleno de grava para amortiguar la reflexión del oleaje.

Con las características antes descritas del tanque de oleaje se podrá experimentar con lo siguiente:

- Oleaje con distancias cortas entre crestas
- Oleaje variable en altura y esbeltez
- Variar la profundidad de la corona de la estructura sumergida a la superficie.
- Variaciones en altura y ancho de la cresta de la estructura sumergida.

Características de las estructuras sumergidas

El cuerpo y cabeza de la estructura sumergida serán conformados por grava. Estas serán construidas cuidadosamente con rocas seleccionadas con una densidad de 2.65 t/m^3 . Las rocas se pintarán en colores diferentes para identificar y cuantificar el daño usando fotografías digitales.

Se experimentara con dos tipos de estructuras sumergidas con características similares pero con diferentes anchos en la base y en la corona y a diferentes niveles de agua. Se estima que el largo de la estructura será de 5 m y la punta o cabeza de la estructura sumergida será redonda. La estructura será ubicada en una plataforma elevada 8 cm con respecto a la base de las paletas del generador de oleaje o fondo del tanque. Por lo tanto, entre la base del generador de oleaje y la base del tanque

(donde se colocaran las estructuras) hay una pendiente que también será construida de concreto.

Las estructuras sumergidas con las que se experimentara tienen las siguientes características que se describen en la Figura 4 y 5 y en la Tabla I.

Sección transversal estrecha

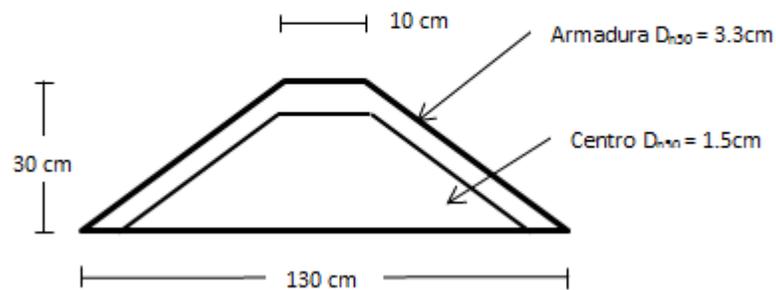


Fig. 14. Geometría de la estructura sumergida con cresta angosta.

Sección transversal amplia

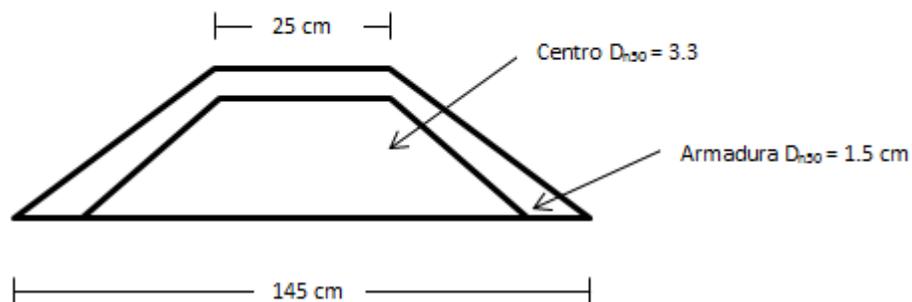


Fig. 15. Geometría de la estructura sumergida con cresta angosta.

Tabla 1. Sección transversal de las estructuras.

Ancho de la cresta	0.01 y 0.25 m
Altura de la cresta	0.30 m
Nivel del agua	-0.10, 0.05, 0.00 y 0.5 m
Tamaño de grava de la armadura	0.033
Tamaño de grava del núcleo	0.015 m
Base de la estructura	1.30 y 1.45 m

Características del sistema de generación de oleaje.

El generador de oleaje consistirá de un mecanismo de biela manivela, haciendo la estructura general del mecanismo con aluminio por su peso y buen manejo que se le puede dar. El mecanismo se controlaría por medio de un motor paso a paso, la paleta se elaboraría a base de acrílico por su resistencia al agua ya que esta va a estar siempre sumergida (Fig. 7). Esta se mantendría rígida por la parte inferior y por la parte superior se adaptaría el mecanismo del eje guía para que se realice un movimiento lineal que entre en contacto con la superficie del agua y de esta manera se generen las olas.

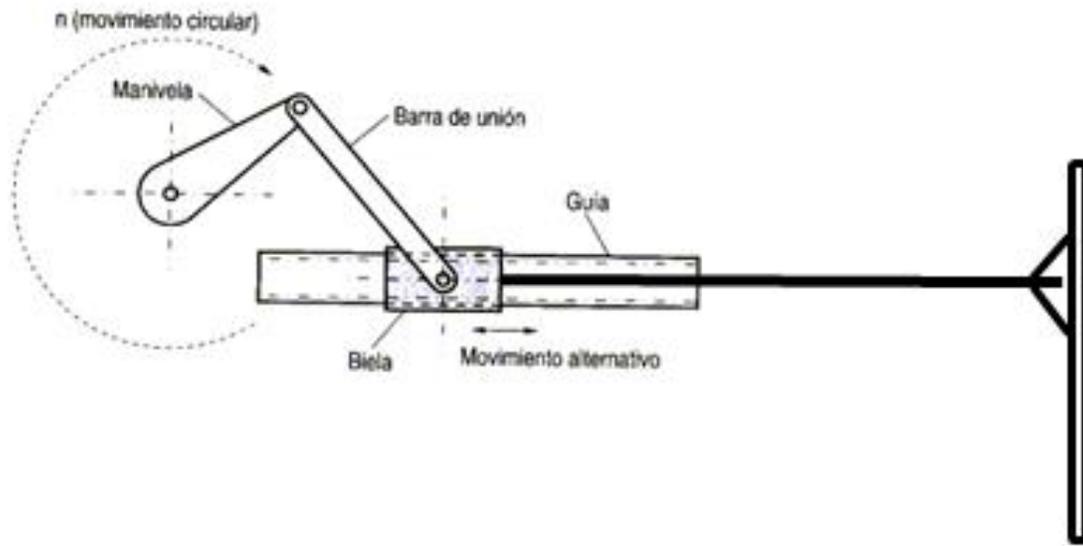


Fig. 16. Sistema de generación de oleaje.

Para la parte del control del motor se requeriría de micro controladores (i.e. Arduino) que se puede programar para que el oleaje producido sea uniforme con el número de paletas que vayan a ser utilizadas.

Sistema de medición de oleaje

En cuanto a las mediciones que se llevarían a cabo dentro del canal se requieren hacer observaciones del oleaje. Por lo tanto, son necesarios sensores que midan con precisión la altura y frecuencia del oleaje. El sensor debe ser controlado y monitoreado por medio de una computadora, en la cual también se muestren los resultados de los experimentos.

El sistema estará compuesto básicamente de las siguientes partes:

- Medidor de oleaje
- Procesador analógico de señales
- Interface digital para la adquisición de datos

Un ejemplo de la sonda de medición de oleaje se muestra en la Fig. 17 la cual es ensamblada en 3 partes.

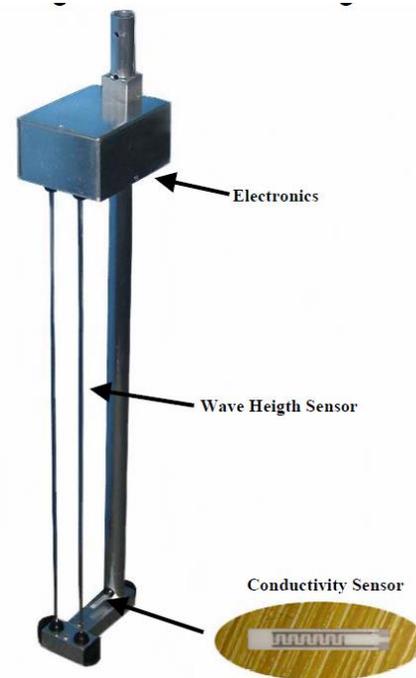


Fig. 17. Sensor de oleaje.

Se requiere como mínimo 3 sensores de oleaje instalados antes de que la ola llegue a la estructura, en un costado de las estructura y posterior a la estructura sumergida.

Construcción del modelo físico.

Se llevó a cabo la construcción del modelo físico en el laboratorio Enzo Levi del IMTA. Debido a las dimensiones del espacio dentro del laboratorio el modelo tuvo que ser ajustado, por lo tanto, en esta sección se describe los detalles de la construcción, el diseño y las dimensiones finales del modelo (Fig. 18). Es evidente que con las nuevas dimensiones del modelo limitan el escalamiento de los procesos físicos en el modelo y por lo tanto este es cualitativo y no cuantitativo.

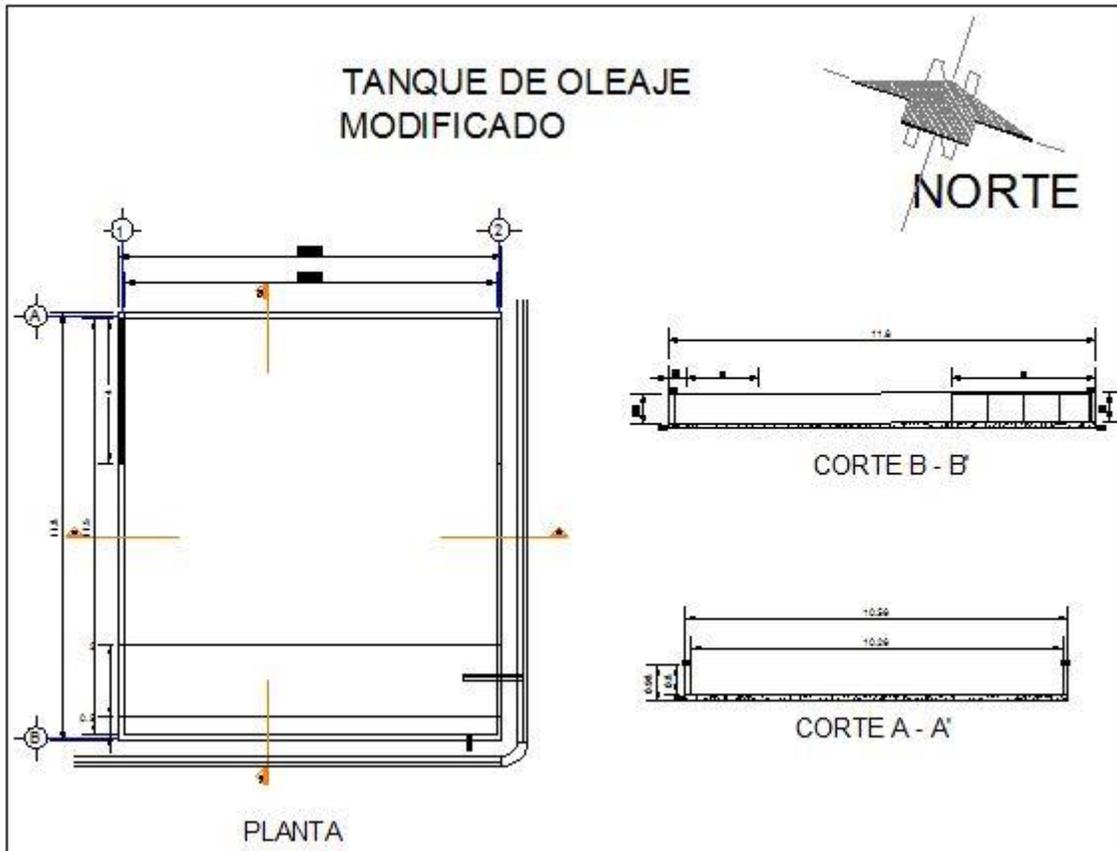


Fig. 18. Características finales del tanque de oleaje.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

Con fecha de 31 de octubre del 2014 se inicia el retiro de accesorios y equipos así como demolición y limpieza del modelo existente, donde se construirá el modelo de adecuación y configuración de tanque de oleaje en el interior del laboratorio Enzo Levi del IMTA (Fig. 19 y Fig. 20).

Se realiza el trazo y nivelación del área por construir donde se acuerda con el jefe del proyecto ajustarlo y adaptarlo al área disponible (Fig. 21).

Para alcanzar los niveles requeridos del proyecto se acuerda hacer la configuración con material de base hidráulica compactado para recibir la plantilla de concreto $f'c=200\text{kg/cm}^2$ de 10 cm de espesor (Fig. 22).

Se lleva acabo el armado de contra trabes perimetrales con seis varillas del núm. 3 y estribos del núm. 2 a cada 15cm de separación y malla electro soldada doble en losa; fabricación mediante medios mecánicos y vaciado de concreto $f'c= 200\text{kg/cm}^2$ para losa de desplante en interior del tanque (Fig. 23).

Los muros perimetrales se construyen con tabique rojo recocido con 14cm de espesor reforzados con 4 castillos de 15x20 en los cuatro lados. Se determina la altura como indica el croquis modificado.

El aplanado con mortero cemento-arena en prop. 1:3 con acabado en el interior y acabado fino en el exterior del modelo.

Se manufactura e instala las dos estructuras de observación con marcos de P.T.R. de 2" calibre reforzado y ventanas de cristal de 12mm de espesor.

La instalación de toma hidráulica para alimentación del modelo se hizo con tubo de p.v.c. hidráulico con 2" de diam. Así como el desagüe de p.v.c de 4" de diam. Incluye: La válvula.

La pintura interior del tanque se utilizó producto de la marca comex copolímero vinílico v-63 color azul pavo y el exterior con calidad vinimex color blanco y color cemento (Fig. 24).



Fig. 19. Proceso de demolición de estructuras existentes en el área de adecuación del tanque de oleaje.



Fig. 20. Proceso de demolición de estructuras existentes e inicio de del basamento del tanque de oleaje.



Fig. 21. Proceso de construcción del basamento del tanque de oleaje.



Fig. 22. Proceso de construcción del colado del basamento del tanque de oleaje.



Fig. 23. Proceso de construcción de las paredes del tanque de oleaje.



Fig. 24. Proceso de terminación y pintura del tanque de oleaje.

Modelaciones físicas bajo diferentes condiciones ambientales.

Los escenarios de modelación bajo diferentes condiciones ambientales, mediante el modelo físico, no se llevaron a cabo debido a que no se completó la parte del generador de oleaje y el sistema de medición. Esto debido a que se subestimó los recursos requeridos para el sistema de generación de oleaje y para el sistema de medición del oleaje. Por lo tanto, está pendiente completar el modelo físico para la generación de los diferentes escenarios y, por lo tanto, establecer los alcances y limitaciones del modelo.

Modelación Numérica

Para la modelación numérica del río Hondo y bahía de Chetumal se utiliza el modelo Delft3D. En esta parte se describe el sistema de coordenadas, las ecuaciones de movimiento y el esquema numérico que utiliza el modelo Delft3D. El modelo Delft3D es un modelo muy completo e incluye un gran número de módulos que se pueden utilizar en diferentes escenarios de modelación y de estructuras hidráulicas. Por lo tanto, cada módulo se enfoca a un dominio específico de interés tal como hidrodinámica (flujo), calidad del agua (campo cercano y lejano), oleaje (generación y propagación), morfología y transporte de sedimentos. Para este caso en particular se utilizara el módulo Delft3D-FLOW (Delft3D-Flow, 2013).

El módulo Delft3D-FLOW es un programa de simulación hidrodinámica que calcula el flujo no estacionario y los fenómenos de transporte inducidos por ríos, mareas y atmosférico en una malla rectangular o curvilínea.

Modelo numérico Delft3D.

El modelo Delft3D-FLOW resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles asumiendo aguas someras y la aproximación de Boussinesq. En la ecuación de movimiento vertical las aceleraciones verticales son despreciadas. En los modelos 3D las velocidades verticales son estimadas de la ecuación de continuidad. Por lo tanto el conjunto de ecuaciones diferenciales en combinación con las apropiadas condiciones iniciales y condiciones de frontera son resueltas en una malla de diferencias finitas.

El módulo Delft3D-FLOW es un programa de simulación hidrodinámica que calcula el flujo no estacionario y los fenómenos de transporte inducidos por la descarga de ríos, marea y atmosférico en una malla con coordenadas ortogonales curvilíneas. Los sistemas coordenados que considera son: cartesianas (ξ, η) y esféricas (λ, ϕ). Una malla rectangular y rectilínea es considerada un caso particular de las coordenadas cartesianas. En la dirección vertical el modelo tiene dos formas de discretización (Fig. 25).

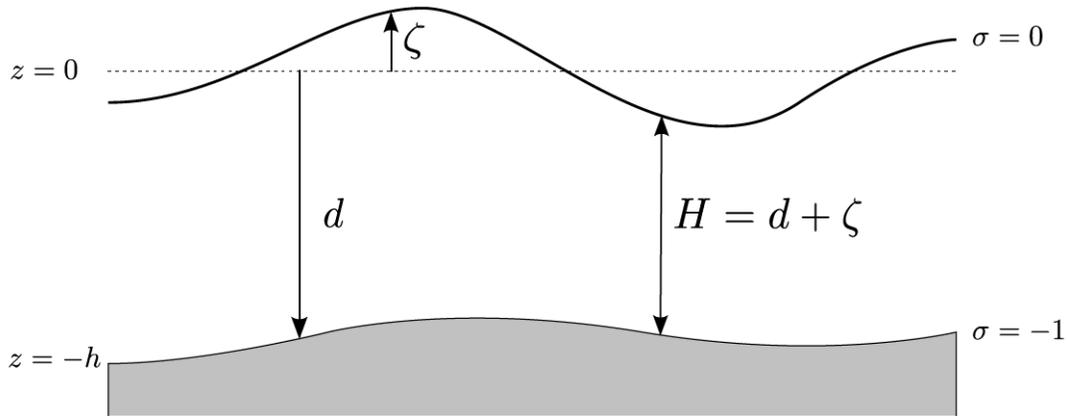


Fig. 25. Definición del nivel (ζ), profundidad (d) y profundidad total (H)

Donde:

- Z la coordenada vertical
- ζ elevación de la superficie libre referida al plano de referencia $z=0$
- d profundidad
- H profundidad total

Conocidos como sistema de coordenadas sigma (modelo - σ), introducido por Phillips (1957) para modelos oceánicos, y el sistema coordenado cartesiano Z conocido también como modelo $-Z$ o nivel- Z (Fig. 26).

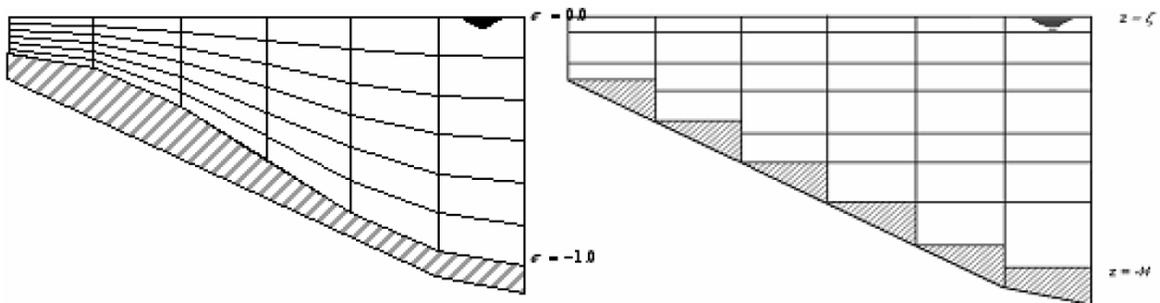


Fig. 26. Sistema de coordenadas en la vertical. Coordenadas sigma (izquierda) y nivel- Z (derecha).

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad integrada en la vertical, con términos de fuentes y sumideros, en el modelo Delft3D está dada como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d + \zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q,$$

2

Dónde:

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ (m) y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ (m) son coeficientes usados para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares.

U y V son las velocidades integradas en la vertical

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma$$

3

Q es la termino fuente/sumidero definido como

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) \, d\sigma + P - E.$$

4

Donde P es precipitación, E es evaporación, q_{in} es una fuente q_{out} un sumidero.

Ecuaciones de movimiento en la horizontal

Las ecuaciones de movimiento se describen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} + F_{\xi} + \\ + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_{\xi}, \end{aligned} \quad 5$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} + F_{\eta} + \\ + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_{\eta} \end{aligned} \quad 6$$

Donde u y v son la velocidad este y norte en el dominio físico; ν_V el coeficiente de viscosidad por remolinos; P_{ξ} y P_{η} son los términos de presión baroclínica, F_{ξ} y F_{η} los esfuerzos turbulentos de momentum (esfuerzos de Reynolds); M_{ξ} y M_{η} corresponde a las contribuciones debido a fuentes o sumideros; y f al parámetro de Coriolis.

Velocidades verticales

La velocidad vertical w , en el sistema de coordenadas sigma, es estimada de la ecuación de continuidad. La velocidad es calculada de acuerdo a:

$$\begin{aligned} w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u \sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \\ + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad 7$$

Generación de malla numérica y configuración del modelo numérico (Flow3D).

Se llevó a cabo la implementación del modelo numérico. Para simular un caso similar al del tanque se generó una malla numérica de que cubrió un área de 4 x 20 km. La profundidad en la zona marina es de 30 m y decrece gradualmente hacia la costa hasta 1 m sobre el nivel medio del mar. El tamaño de la malla tiene un delta (x,y) de 100 m. Asimismo se ubicaron 3 estructuras sumergidas paralelas a la línea de costa ubicadas a una distancia de 1.5 km a una profundidad de 10 m. La estructura tiene una altura de 8 m por lo tanto la cresta es de la estructura esta a 2 m de profundidad. Para este caso en particular se considera un oleaje viniendo del norte (Fig. 27). En la implementación del modelo se definen puntos de monitoreo para evaluar los resultados los cuales se muestran en la Fig. 28.

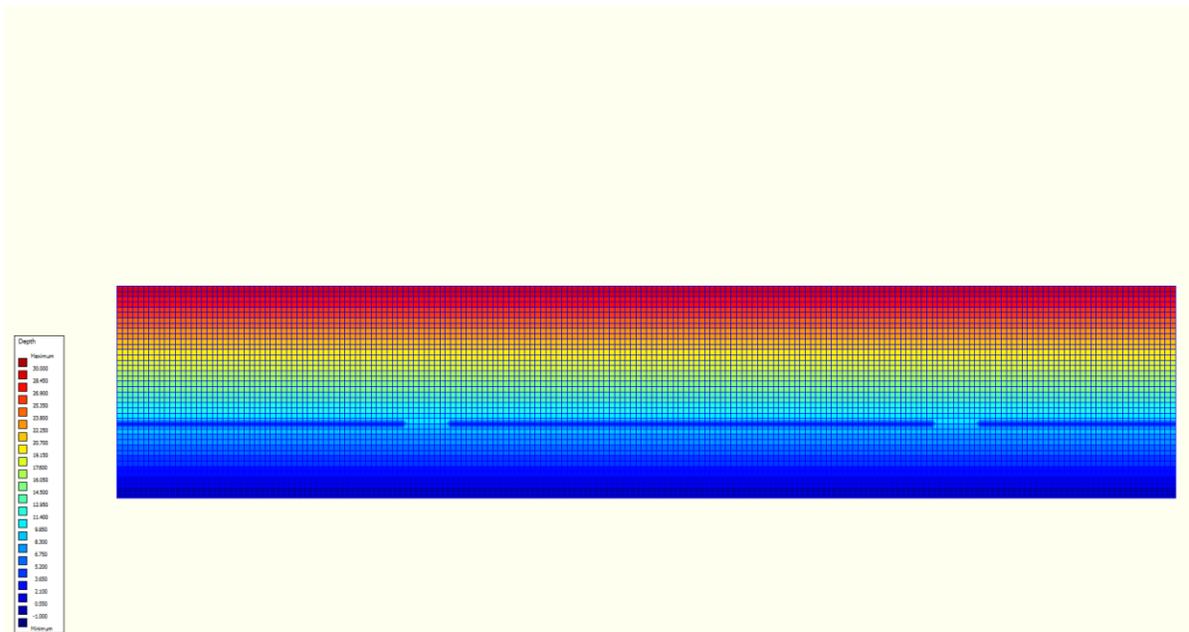


Fig. 27. Generación de malla numérica y profundidad de zona costera

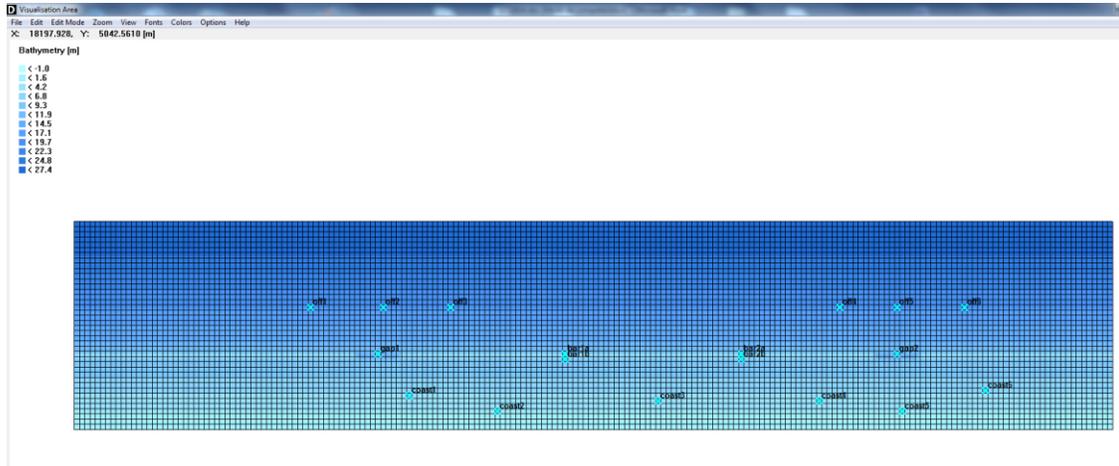


Fig. 28. Puntos de monitoreo dentro del área de modelación.

Modelación de escenario de estructuras sumergidas.

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 29 la cual nos muestra el comportamiento de la ola significativa en la zona e mar abierto y al interior de la zona protegida por las estructuras sumergidas.

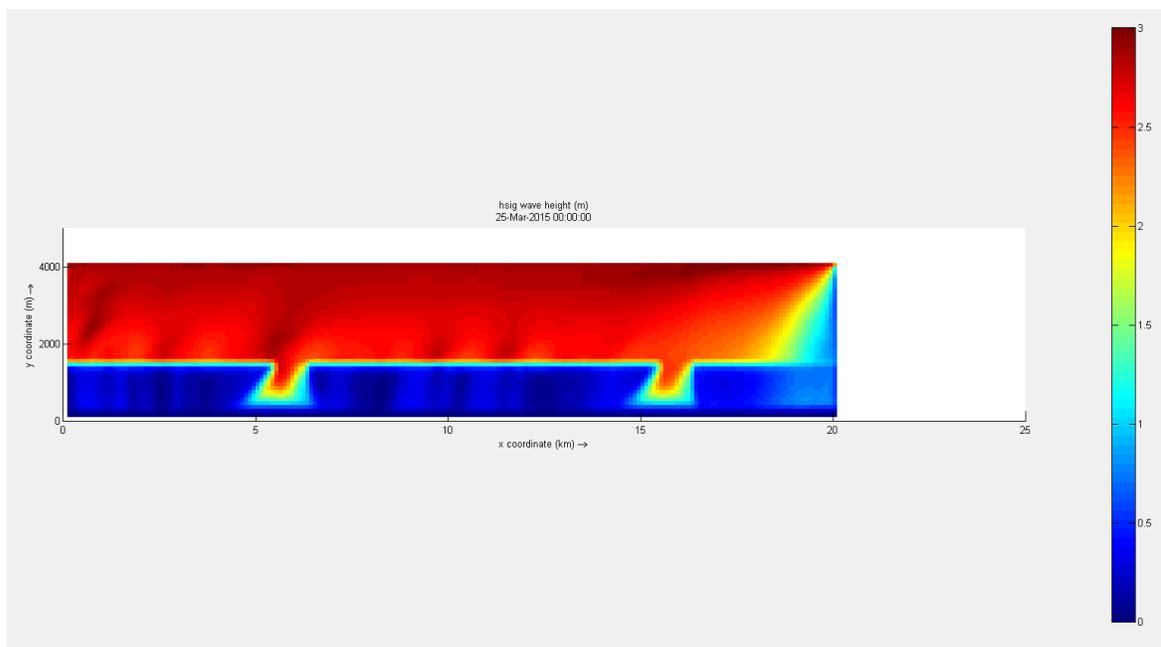


Fig. 29. Altura de ola significativa modelada para la zona costera.

Las corrientes inducidas por el oleaje se presentan en la Fig. 30. Estas corrientes son las responsables de inducir erosión o deposición en la costa. En la Fig. 31 se presenta una ampliación de las corrientes y del nivel del mar inducido por el oleaje.

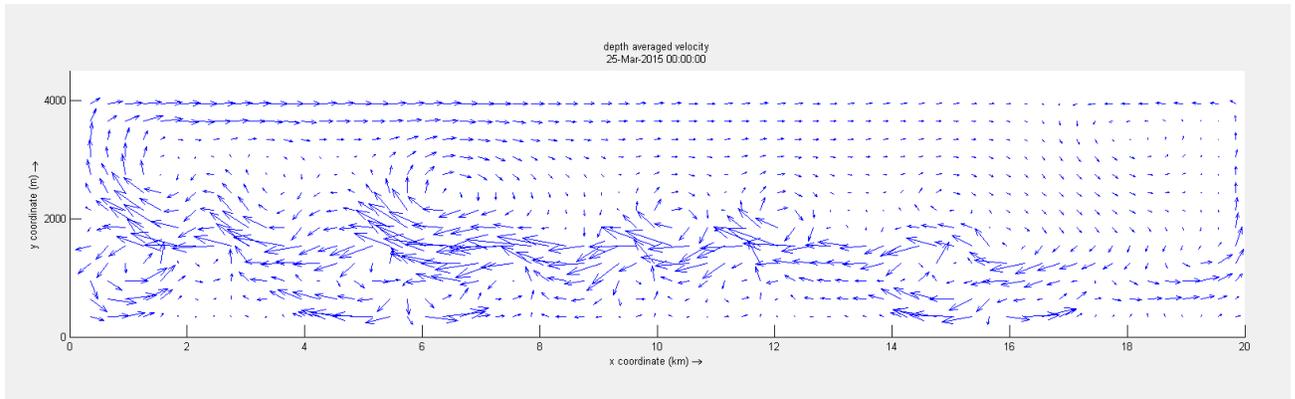


Fig. 30. Puntos de monitoreo dentro del área de modelación.

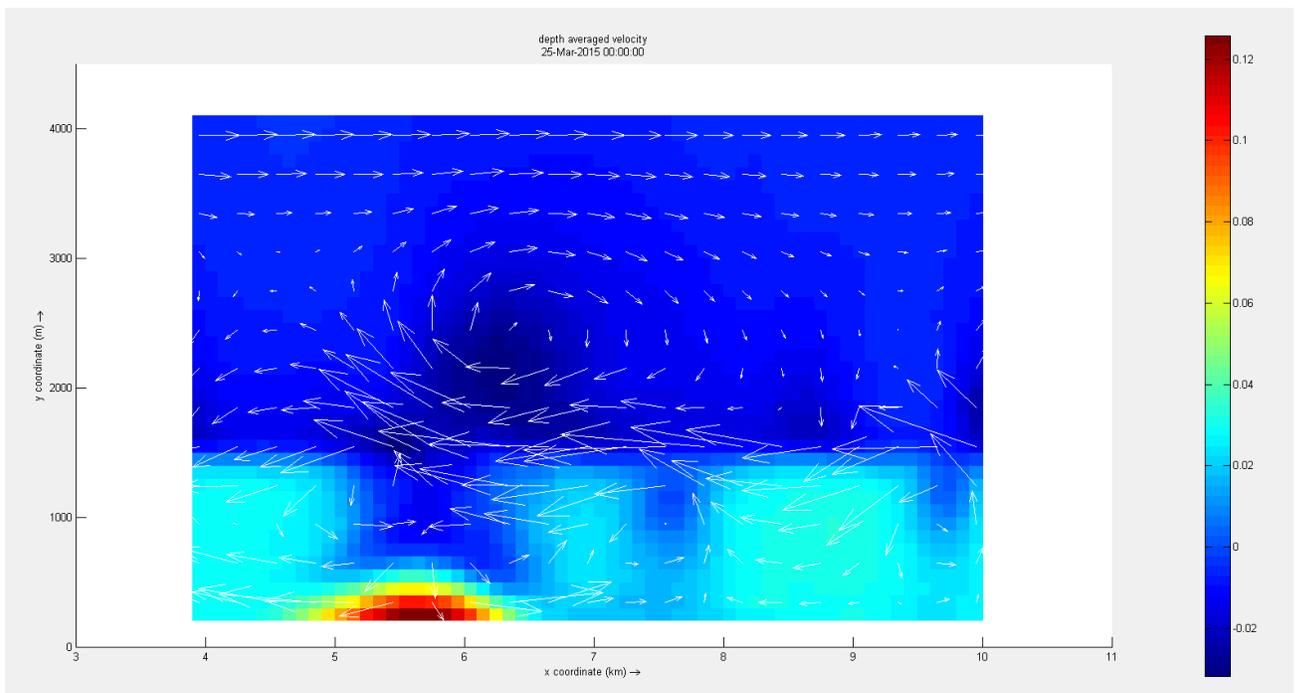


Fig. 31. Elevación del nivel inducido por el oleaje arribando a la costa y vectores de corrientes en el área cercana a las estructuras sumergidas.

Finalmente, el resultado más relevante de la modelación son los mapas de erosión/sedimentación inducida por las corrientes generadas por el oleaje. Con estos mapas se puede evaluar claramente el efecto de las estructuras costeras y su impacto en la protección de la costa.

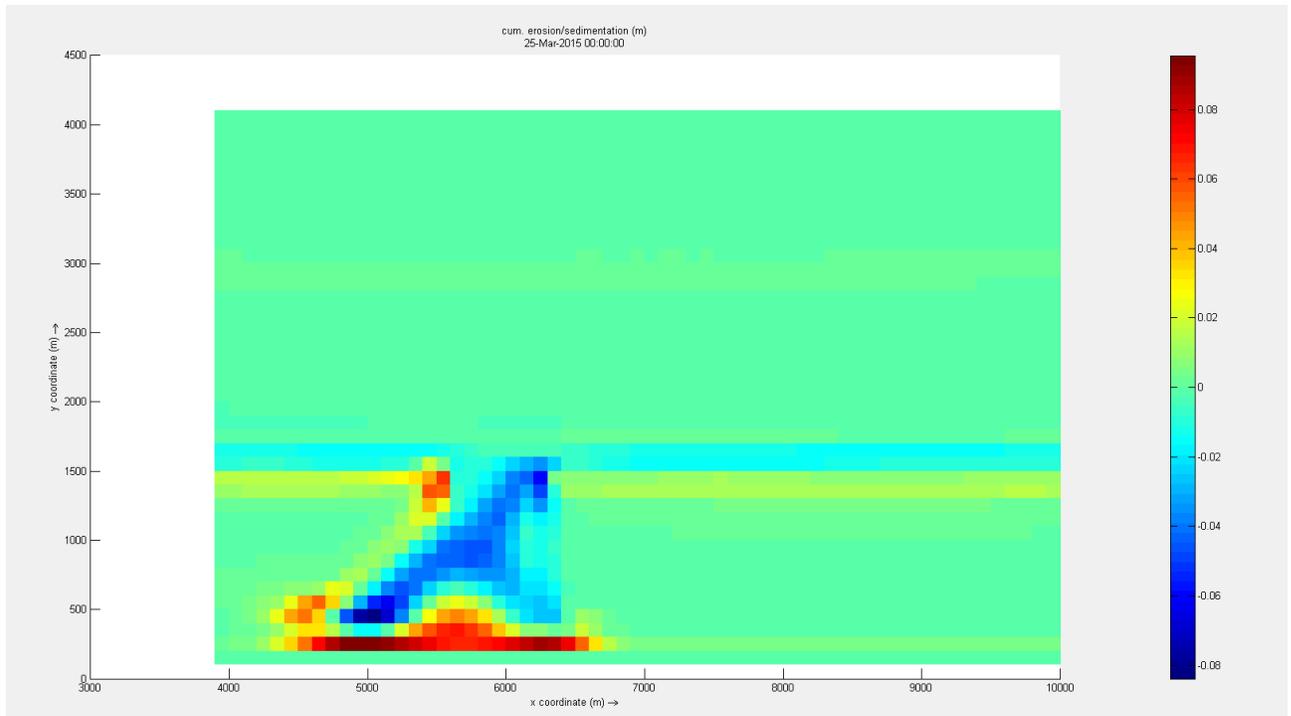


Fig. 32. Modelación numérica de la erosión/depositación de sedimentos en la zona costera protegidas con estructuras sumergidas.

Análisis de resultados

El modelo Delft3D nos permite estudiar la dinámica de estructuras sumergidas y establecer zonas de erosión y sedimentación. Los resultados numéricos no se pueden comparar con el modelo físico, sin embargo, este modelo será completado y los resultados numéricos podrán ser comparados para establecer el potencial o limitación de los resultados numéricos. Cabe mencionar que los resultados numéricos están respaldados por una serie sistemática de mediciones en laboratorio y campo por parte de Deltares y otros centros de investigación en el mundo.

Conclusiones y recomendaciones

La erosión costera es uno de los problemas que se encuentra latente en todas las playas del país. Con la finalidad de establecer formas de mitigación se desarrolló un modelo físico e implementó un modelo numérico para investigar los procesos que determinan la dinámica costera. El modelo físico del tanque se puede considerar en tres partes que consisten en la estructura del tanque, el generador de oleaje y el sistema de medición de oleaje. Como parte del proyecto se construyó el tanque de oleaje pero quedó pendiente la implementación del generador de oleaje y el sistema de medición del mismo.

Asimismo, se implementó el modelo numérico Delft3D desarrollado por el grupo Deltares de los Países Bajos. El modelo Delft3D es un modelo tridimensional que modela en la horizontal en coordenadas cartesianas o curvilíneas y en la vertical con coordenadas Z o sigma. Incorpora los procesos físicos de mareas, oleaje y transporte de sedimentos. El modelo es versátil y se implementa para modelar un escenario de una zona costera de aproximadamente 20 km a lo largo de la costa y 4 km mar adentro. Escenarios de la transformación del oleaje por el efecto de estructuras sumergidas es modelado, así como, el efecto en el transporte de sedimentos. El modelo Delft3D mostró ser muy versátil y capaz de modelar escenarios costeros con condiciones de oleaje, sedimentos y corrientes, asimismo, puede incorporar muy fácilmente estructuras sumergidas que inhiban la transferencia de energía hacia la costa. El escenario estudiado muestra resultados relevantes que en un futuro serán comparados con el modelo físico.

Finalmente, las aplicaciones numéricas son prometedoras y por lo tanto se continuará con la aplicación del modelo a lugares específicos del país.

Referencias

- DelftD-FLOW, 2013. FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Delft, The Netherlands.
- Lanberti, A., R. Archetti, M Kramer, D. Paphitis, C. Mosso y M. Di Risio, 2005. European experience of low crested structures for coastal management. Coastal Engineering 52, 841-866.
- Kramer, M. y H. Burcharth. 2002. Environmental Design of Low Crested Coastal Defence Structures. EU Fifth Framework programme 1998-2002.
- Phillips, N. A., 1957. "A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting." Journal of Meteorology 14: 184–185. 177, 187
- Pilarczyk, K. 2003. Design of low crested (sumerged) structures- an overview. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries. Colombo, Sri Lanka.
- QUICKIN, 2013. Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness. User Manual. Hydro-Morphodynamics & Water Quality. Delft, The Netherlands.
- RGFGRID, 2013. Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE User Manual. Hydro-Morphodynamics. Delft, The Netherlands.
- Rossini, W.M., C.A. Guedes, K. Nishimoto, J.J. Da Cruz y M.R. Gongora-Rubio. Water waves measurement instrument with conductance compensation. Manuscrito no publicado.