

## Modelación numérica de la incidencia del oleaje en el trazo de una vía carretera

HERRERA-DÍAZ, Israel Enrique\*†, TORRES-BEJARANO, Franklin Manuel', MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri, Yunuén y GALVÁN-CHÁVEZ, Arturo.

*Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra, Mutualismo 303 Col. Suiza C.P. 38060 Celaya, Gto. México*  
*'Universidad de la Costa, Calle 58 # 55 - 66. Barranquilla, Colombia*

Recibido Abril 6, 2016; Aceptado Junio 14, 2016.

### Resumen

Este trabajo muestra la aplicación de un modelo numérico previamente desarrollado y modificado de la ecuación de Berkhoff (Herrera, 2009), el cual está desarrollado en un esquema en diferencias finitas y ha sido validado y aplicado en diferentes trabajos en zonas de aguas poco profundas (Herrera 2015). La aplicación del modelo se llevo a cabo en el proyecto de una vía carretera que atraviesa una laguna costera y donde el conocer la magnitud de la altura de ola incidente en la estructura del cuerpo del camino es necesario para el diseño de los elementos de protección y geometría del camino. Los resultados obtenidos de la modelación dan paso a proponer el tipo y dimensiones de las obras de protección requeridas para proteger la estructura del camino.

### Modelación, oleaje, vía terrestre, laguna costera

### Abstract

This paper shows the application of a numerical model previously developed and modified the equation of Berkhoff (Herrera, 2009), which is developed in a finite difference scheme and has been validated and applied in different jobs in shallow water areas (Herrera 2015). The application of the model was carried out in the project one-way road through a coastal lagoon where knowing the magnitude of the incident wave height in the structure of the road body is necessary for the design of the protection elements and road geometry. The results of modeling give way to propose the type and dimensions of the required protection works of the road structure.

### Modelling, sea wave, highway, coastal lagoon

**Citación:** HERRERA-DÍAZ, Israel Enrique, TORRES-BEJARANO, Franklin Manuel', MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri, Yunuén y GALVÁN-CHÁVEZ, Arturo. Modelación numérica de la incidencia del oleaje en el trazo de una vía carretera. *Revista de Planeación y Control Microfinanciero* 2016, 2-4:53-64

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: eherrera@ugto.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El diseño de elementos estructurales en obras portuarias como muelles, rompeolas y escolleras son imprescindibles para fortalecer la infraestructura de una región; el conocer el comportamiento del mar en zonas costeras es primordial y por ende el estudio del oleaje optiene mucha importancia. Los procesos de transformación del oleaje se traducen fundamentalmente en: variación de la altura de la ola y en la dirección de propagación, llamados refracción, difracción, reflexión y rompiente.

Particularmente en este estudio se realiza un análisis mediante el empleo de modelos numéricos, con lo cual, se puede predecir el comportamiento de diversos fenómenos hidráulicos que son importantes conocer para la proyección de las diversas obras requeridas.

Dado que el objetivo principal del estudio, es determinar la magnitud y frecuencia de la incidencia del oleaje en la zona de estudio, es necesario considerar los diferentes factores que producen la agitación de la superficie del mar; el principal agente de generación de agitación es el oleaje, el cual es producido por la fricción que produce el viento sobre la superficie acuática.

Los datos de dirección y altura de ola son obtenidos del Ministerio de Defensa Nacional, Dirección General Marítima, Centro de Investigaciones Oceanográfica e Hidrográficas de Colombia.

Para la realización de este proyecto se requirió la consulta y análisis de diversas fuentes de información.

## Materiales y Metodología

### Descripción del modelo de oleaje

Se emplea la ecuación desarrollada por Berkhoff (1972) conocida también como la ecuación de la pendiente suave, que es una de las ecuaciones que funciona muy bien para simular los fenómenos de refracción-difracción-reflexión, en lugares donde la irregularidad del fondo provocaría concentración de energía durante el avance del frente de ola. Esta ecuación tradicionalmente se puede descomponer como lo muestra la ec. (1):

$$\underbrace{\frac{\partial E(x,y,t,f,\theta)}{\partial t}}_1 + \underbrace{\nabla \cdot [C_y(x,y,f) * E(x,y,t,f,\theta)]}_2 = \underbrace{S_w}_3 + \underbrace{S_m}_4 + \underbrace{S_d}_5 + \underbrace{S_f}_6 + \underbrace{S_p}_7 \quad (1)$$

donde el primer termino representa el índice del cambio temporal del espectro, el segundo término representa la propagación de la energía de la onda, el tercer término representa entradas del viento, el cuarto término representa la redistribución de la energía de la onda entre diversos componentes no lineales que se presenten, el quinto término representa la disipación debido a la rompiente, el sexto término representa las pérdidas debido a la fricción, y el séptimo término representa las pérdidas debido a la filtración.

Se emplea la modelación numérica para resolver la ec. (1) en una aproximación elíptica (ec. 2) que describe la propagación de una onda en la superficie libre periódica y de amplitud finita sobre batimetrías complejas, donde su deformación al aproximarse a zonas de baja profundidad y obstáculos presenta los fenómenos de refracción, difracción y reflexión (Panchang et al, 1991).

$$\nabla(C_{cg} \nabla \eta) - \frac{c_g}{c} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

donde:

$\eta(x,y)$  es el nivel o elevación de la superficie libre (m)

$C(x,y)$  Celeridad ó velocidad de fase (m/s)

$C_g(x,y)$  Celeridad de grupo (m/s)

La solución de la ecuación de Berkhoff es trabajada y expresada en función de la razón de flujo del oleaje en sus componentes x e y (Fuentes, 1996), esto mediante un esquema implícito en el tiempo por medio de las siguientes ecuaciones en diferencias finitas.

$$c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} = - \frac{\partial Q_x}{\partial t} \quad (3)$$

$$c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} = - \frac{\partial Q_y}{\partial t} \quad (4)$$

en donde  $Q(x,y)$  es la razón del flujo en el plano horizontal (m/s).

Para la solución de la ecuación de la variación de la superficie libre debido al oleaje en función de las razones de flujo antes mencionadas se tiene:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{1}{n} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (nQ_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nQ_y) \right] \quad (5)$$

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (6)$$

donde:

$n(x,y)$  Factor de grupo

$k(x,y)$  Número de onda ( $2\pi/L$ )

$h(x,y)$  Profundidad (m)

Este tipo de ecuaciones tienen la ventaja de disponer de los valores de las razones del flujo y que permiten encontrar la dirección del oleaje y plantear la presencia de obstáculo de una forma sencilla.

### Condiciones de frontera

Para obtener la propagación del oleaje en las fronteras libres, se aplica la ley de Snell, la cual permite que el oleaje salga del dominio de estudio sin modificar su dirección ni magnitud; a los obstáculos o estructuras dentro del dominio se le consideran fronteras sólidas, por lo que estas se proponen como una pared totalmente vertical, esta pared presenta 3 condiciones de reflexión las cuales se manifiestan con un coeficiente de ( $K_L$ ), cuyo valor está limitado entre 0 y 1 (0 para una estructura que no presenta reflexión, 0.5 para una parcialmente reflejante y 1 para una condición totalmente reflejante). Lo anterior, se aplica en todo el perímetro de las estructuras.

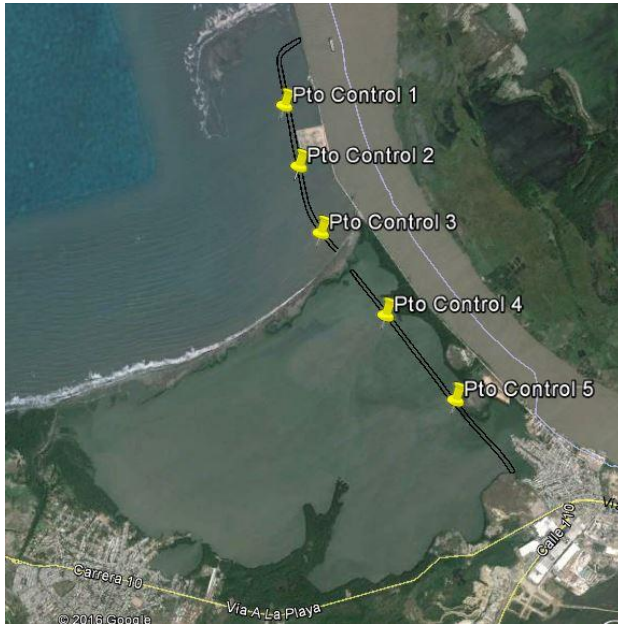
### Validación del modelo

Para efectuar la validación del módulo de oleaje, se diseñaron dominios similares a los ejemplos teóricos de la literatura, con la finalidad de reproducir los fenómenos de refracción, difracción y reflexión, determinando alturas de ola, ángulos de incidencia y comparaciones entre las soluciones analíticas y los resultados de la modelación.

Estas comparaciones se llevaron a cabo por Herrera (2009) y aplicados a problemas similares (Herrera, 2015).

### Resultados y Aplicación

La zona de estudio es una laguna costera (fig. 5) que se ubica en la Cd de Barranquilla Colombia.



**Figura 1** Localización de la laguna costera

El objetivo principal del estudio, es determinar la magnitud y frecuencia de la incidencia del oleaje en la zona de estudio, es necesario considerar los diferentes factores que producen la agitación de la superficie del mar; el principal agente de generación de agitación es el oleaje, el cual es producido por la fricción que produce el viento sobre la superficie acuática.

En la figura (1), se presenta el trazo de la vía terrestre que cruza la laguna costera en la margen derecha, así mismo, se colocan puntos de control para el monitoreo de la altura de ola y así estimar el nivel al cual debe estar diseñado y construido la superficie de rodamiento y las obras de protección (coraza) que llevará el camino.

Los datos de dirección y altura de ola son obtenidos del Ministerio de Defensa Nacional, Dirección General Marítima, Centro de Investigaciones Oceanográfica e Hidrográficas.

Para las condiciones de simulación con oleaje ordinario:

Dirección: Norte

Altura de ola: 1.20 m

Periodo: 6.0 s

Tiempo simulación: 15 días

Para las condiciones de oleaje extraordinario se tiene:

Dirección: Norte

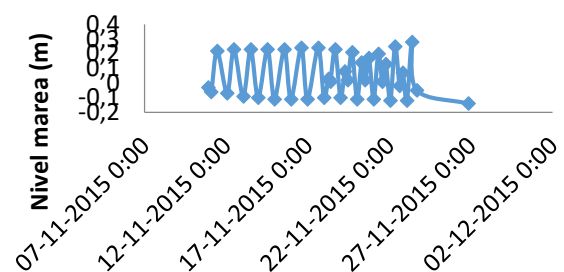
Altura de ola: 3.60 m

Periodo: 8.1 s

Tiempo simulación: 15 días

Las condiciones de marea para ambos escenarios se muestran en la figura (2), donde el tiempo de registro es para todo el mes de noviembre de 2015.

## Variación de la marea



**Figura 2** Variación de la marea para el mes de noviembre de 2015

El dominio de estudio, es discretizado en un mallado en diferencias finitas (figura 3), con espaciamiento de 15 x 15 m en cada celda de cálculo.

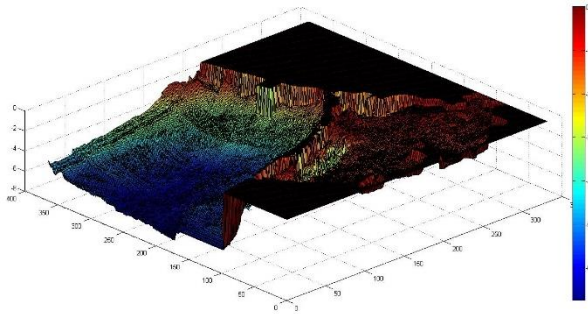


Figura 3 Malla numérica para la simulación de la laguna costera

Simulación sin vía terrestre

Condiciones normales u ordinarias

A continuación se presentan los resultados del análisis de las simulaciones para el mes de noviembre.

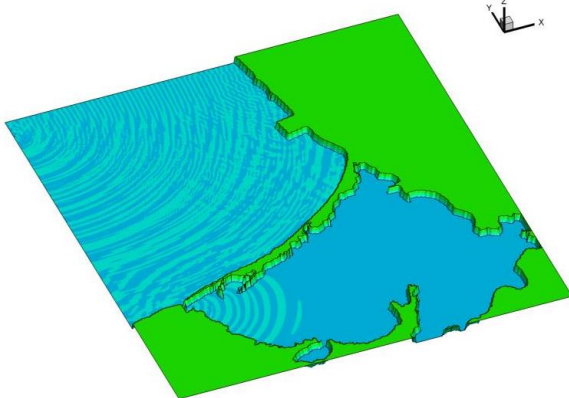
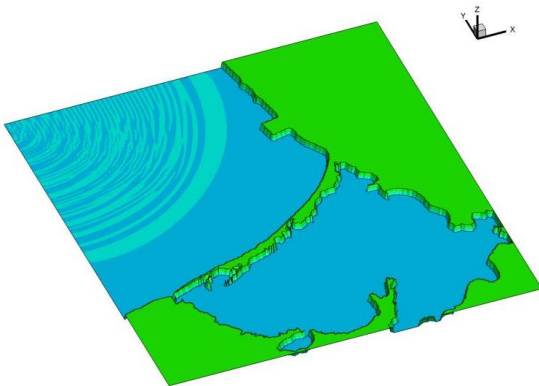
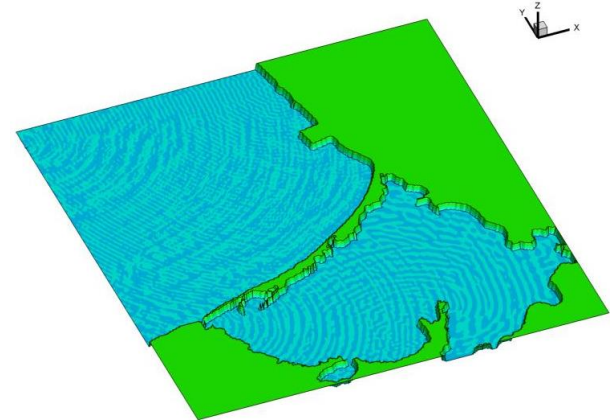
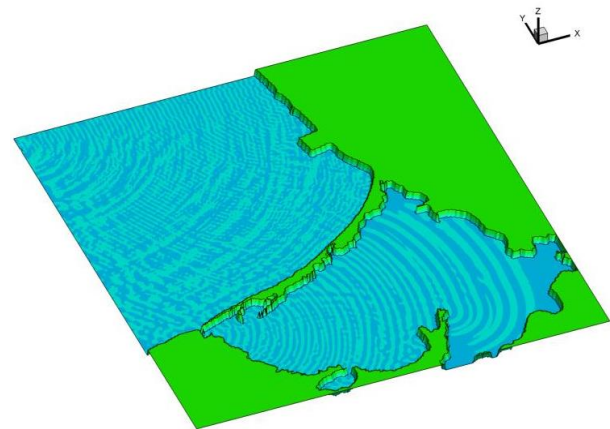


Figura 4 Desarrollo de la propagación del oleaje en el dominio de estudio

En la figura 4, se presenta un diagrama de la distribución de los puntos de control sobre el dominio de estudio, los cuales están ubicados en la proximidad del camino.

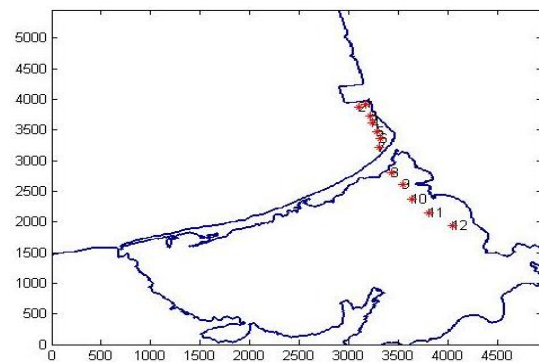


Figura 4 Puntos de control de incidencia del oleaje y alturas de ola

Los resultados de las alturas de ola registradas en los puntos de control se aprecian en las figuras (5) a (7), donde se observa la evolución de la superficie libre del mar en un tiempo de simulación de 3000 segundos (menos de 1 hora), donde se observa que la altura de ola se empieza a estabilizar en condiciones periódicas del oleaje.

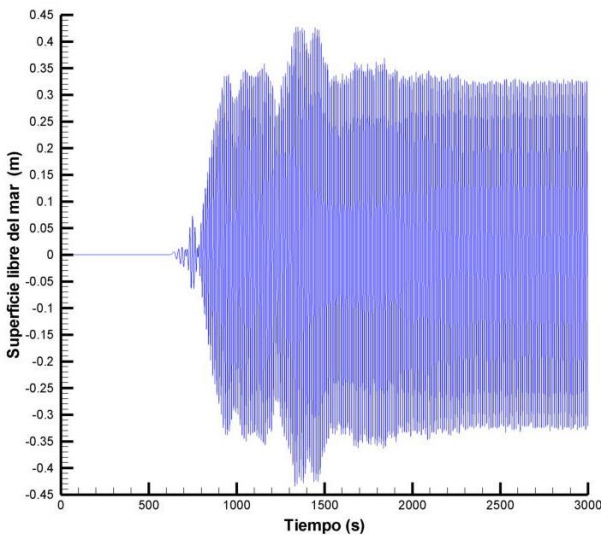


Figura 5 Fluctuación de la superficie libre en el punto 3

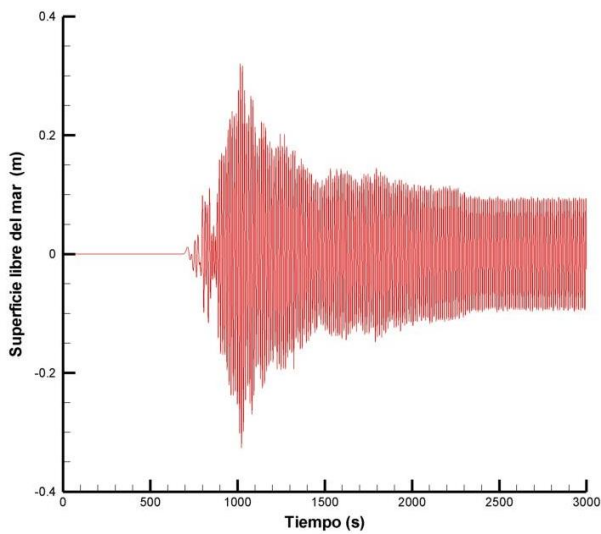


Figura 6 Fluctuación de la superficie libre en el punto 7

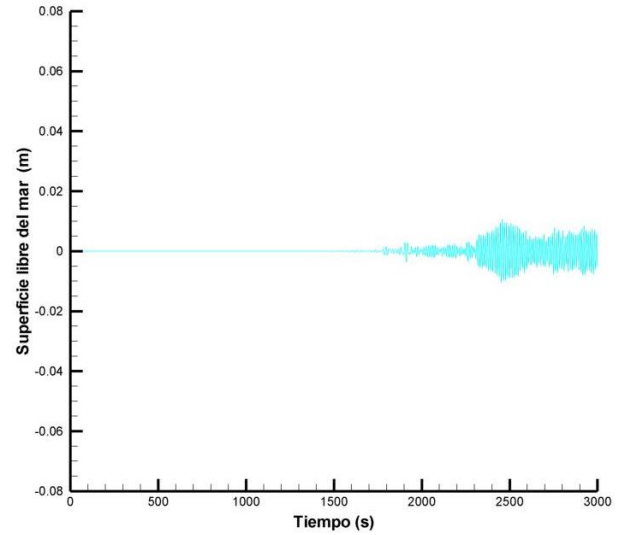
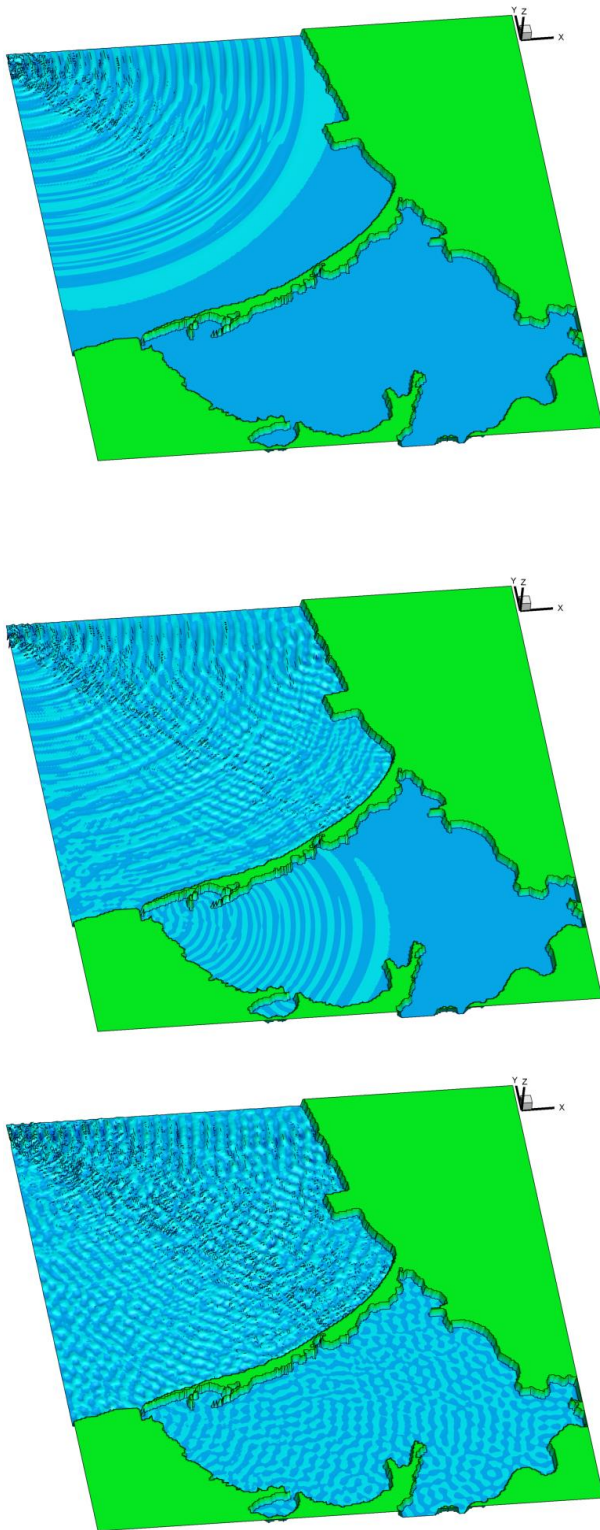


Figura 7 Fluctuación de la superficie libre en el punto 10

### Condiciones extraordinarias

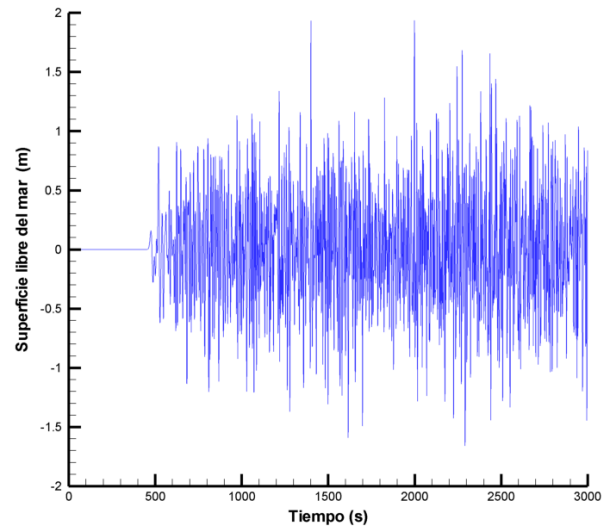
Los resultados de la simulación no difieren demasiado de la condición de oleaje normal, la diferencia radica en la altura de ola que alcanza esta condición en especial. A continuación en la figura (8) se muestra la simulación del oleaje para el mes de noviembre.



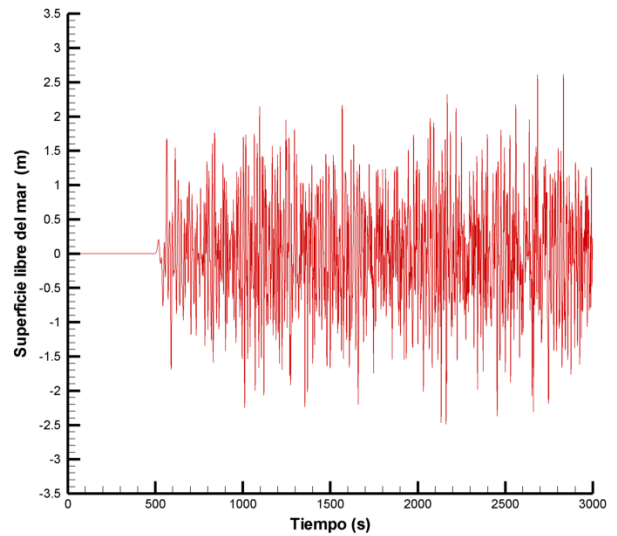


**Figura 8** Desarrollo de la propagación del oleaje en el dominio de estudio para evento extraordinario

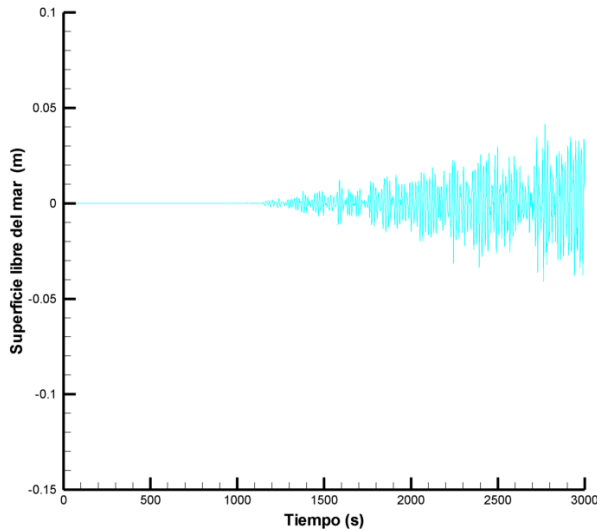
De forma similar, a continuación en las figuras (9) a (11) se presentan las alturas de ola registradas en los puntos de control para el estado extraordinario.



**Figura 9** Fluctuación de la superficie libre en el punto 3 para evento extraordinario



**Figura 10** Fluctuación de la superficie libre en el punto 7 para evento extraordinario



**Figura 11** Fluctuación de la superficie libre en el punto 10 para evento extraordinario

A continuación en las tablas (1) y (2) se presenta la comparativa de 3 estaciones (3, 7 y 10) para ambos escenarios observando los cambios entre ellos, considerando la elevación de la marea y la altura de ola para el mes de simulación.

Escenario	Altura de ola (m)	Altura de ola (m)	Altura de Ola (m)
	Visor 3	Visor 7	Visor 10
Condiciones normales	0.862	0.647	0.113
Condiciones extraordinarias	4.322	5.990	0.247

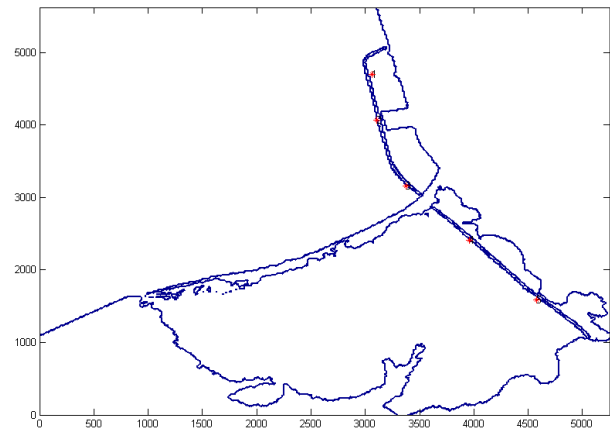
**Tabla 1** Altura de ola máxima referida al nivel de bajamar media inferior para los visores 3, 7 y 10

Escenario	Altura de ola (m)	Altura de ola (m)	Altura de Ola (m)
	Visor 3	Visor 7	Visor 10
Condiciones normales	0.4001	0.3250	0.0571
Condiciones extraordinarias	1.8101	1.6170	0.1221

**Tabla 2** Altura de ola promedio referida al nivel de bajamar media inferior para los visores 3, 7 y 10

### Simulación con vía terrestre

De forma similar se muestran los resultados de la simulación para la zona de estudio ahora contemplando el trazo del camino, para la simulación se consideró que la estructura del camino es a talud con coraza de concreto (hormigón) prefabricado (dolo o tetrapodo) con un coeficiente de reflexión del 0.12, por lo que el amortiguamiento de la energía se considera en promedio de un 75%; se repiten las mismas condiciones de simulación y se determinan nuevos visores de interés, cuya ubicación se aprecia en la figura siguiente.

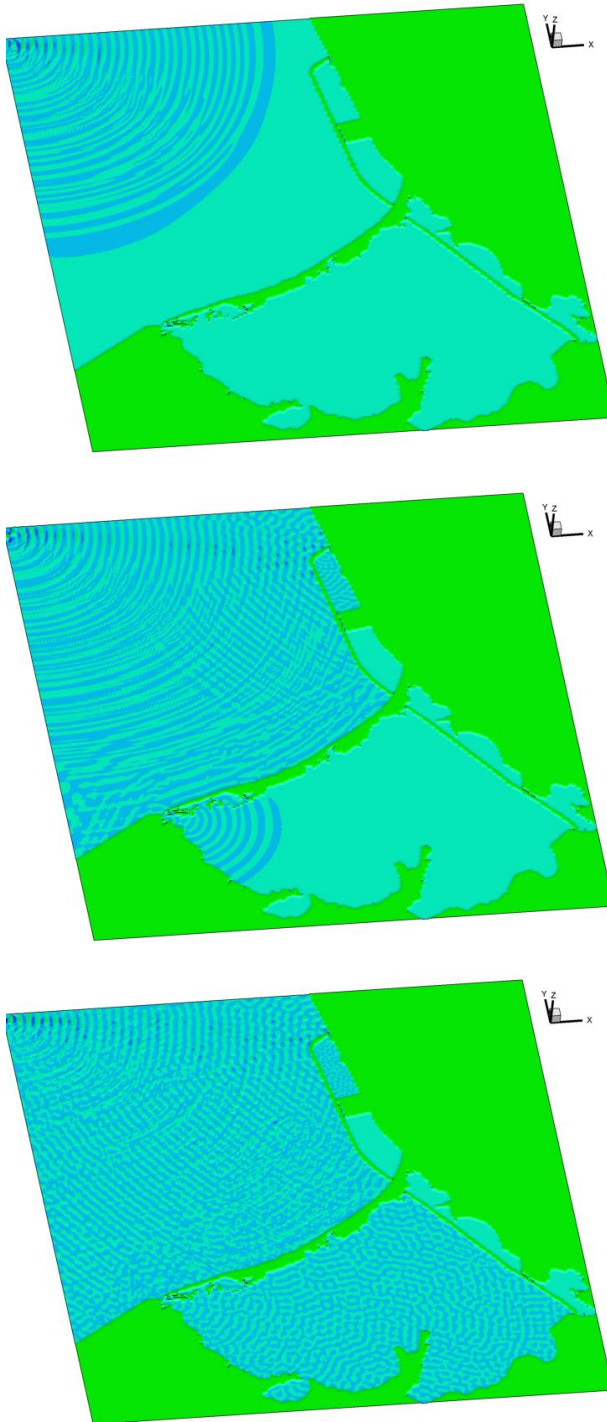


**Figura 12** Puntos de control de incidencia del oleaje y alturas de ola en el trazo del camino

### Condiciones normales u ordinarias

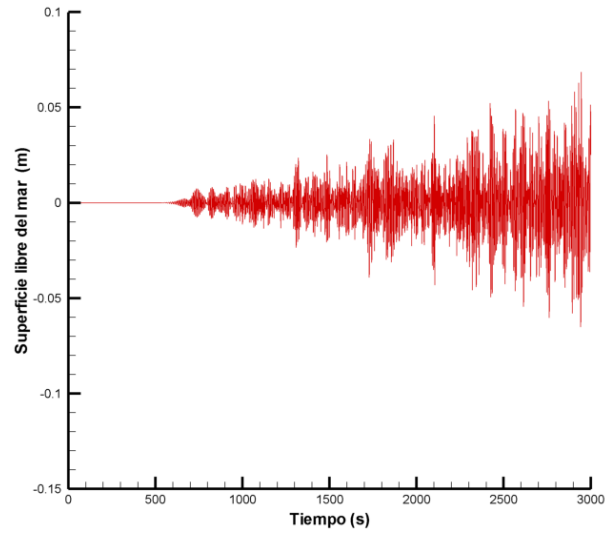
Los resultados que se presentan a continuación en la figura (13), tienen las mismas condiciones que las simulaciones anteriores, con la diferencia de observar el comportamiento de la altura de ola por la presencia del camino; las imágenes siguientes muestran un escenario favorable para el mes de noviembre.



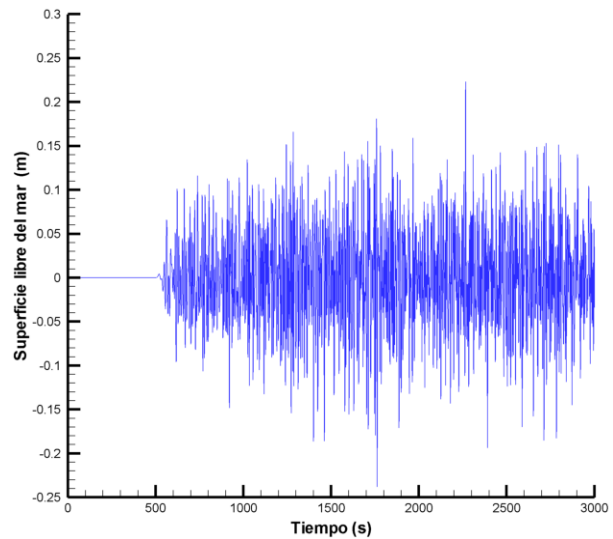


**Figura 13** Desarrollo de la propagación del oleaje en el dominio de estudio con camino en condiciones normales

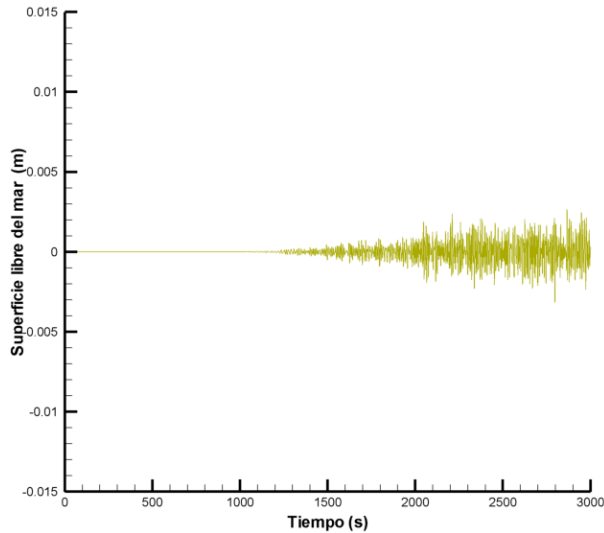
Los valores registrados en los puntos de control, se muestran en las figuras (14) a (16) siguientes.



**Figura 14** Fluctuación de la superficie libre en el punto 1 camino



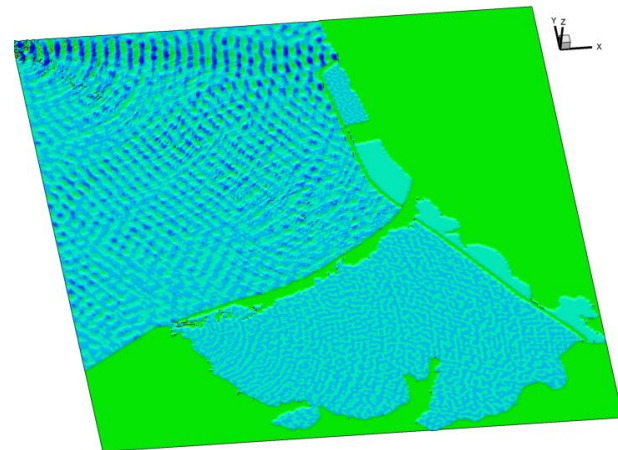
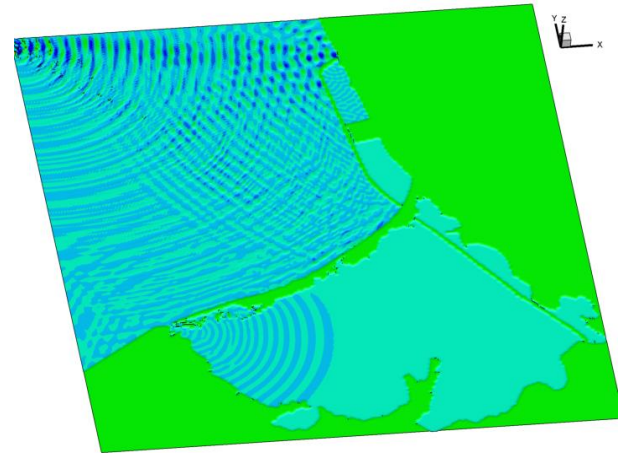
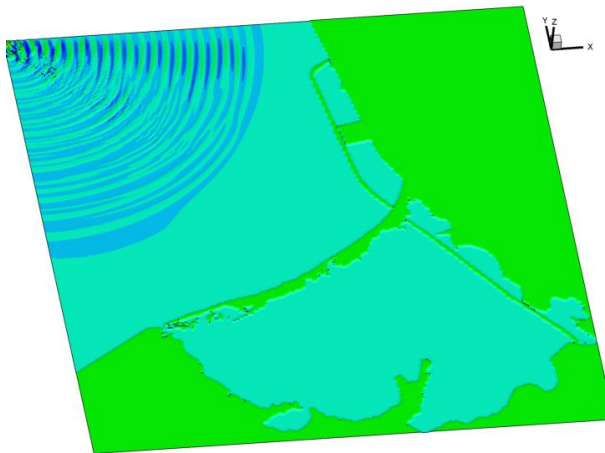
**Figura 15** Fluctuación de la superficie libre en el punto 3 camino



**Figura 16** Fluctuación de la superficie libre en el punto 5 camino

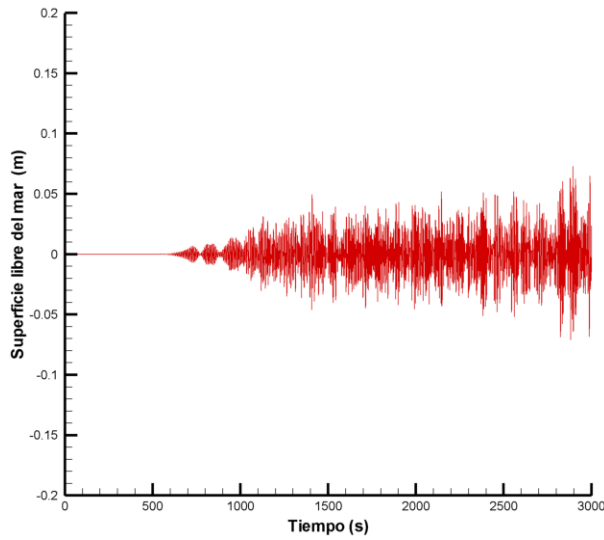
### Condiciones extraordinarias

La figura (17) muestra los resultados para el escenario extraordinario con presencia de infraestructura, se observa que el comportamiento del movimiento del agua es similar al escenario normal, con la diferencia en la magnitud de los valores de la altura de ola.

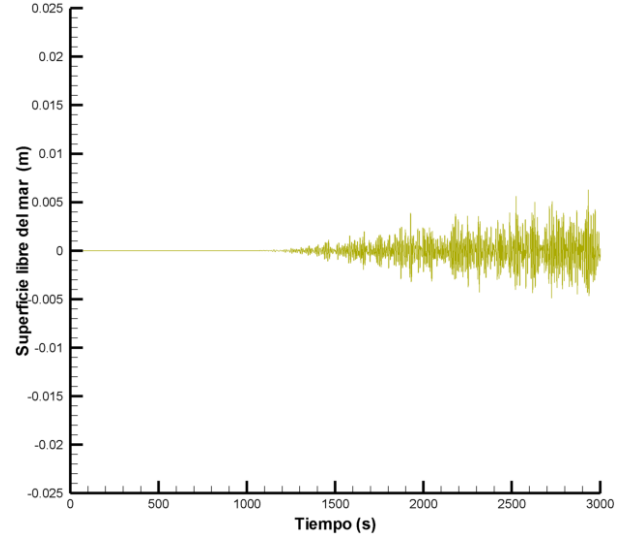


**Figura 17** Desarrollo de la propagación del oleaje en el dominio de estudio con camino en condiciones extraordinarias

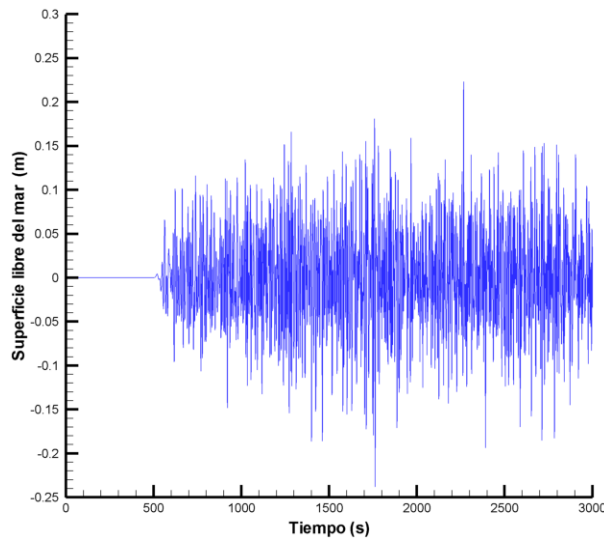
Los valores registrados en los puntos de control para estas condiciones se muestran a continuación en las figuras (18) a (20).



**Figura 18** Fluctuación de la superficie libre en el punto 1 camino condiciones extraordinarias



**Figura 20** Fluctuación de la superficie libre en el punto 5 camino condiciones extraordinarias



**Figura 19** Fluctuación de la superficie libre en el punto 3 camino condiciones extraordinarias

Por último, en las tablas (3) y (4) se presenta la comparativa de las estaciones 1, 3 y 5 para ambos escenarios observando los cambios entre ellos no considerables, tomando en cuenta la elevación de la marea y la altura de ola para el mes de simulación.

Escenario	Altura de ola (m)	Altura de ola (m)	Altura de Ola (m)
	Visor 1	Visor 3	Visor 5
Condiciones normales con camino	0.0949	0.2330	0.0100
Condiciones extraordinarias con camino	0.1442	0.4421	0.0238

**Tabla 3** Altura de ola máxima referida al nivel de bajamar media inferior para los 5 visores

Escenario	Altura de ola (m)	Altura de ola (m)	Altura de Ola (m)
	Visor 1	Visor 3	Visor 5
Condiciones normales con camino	0.0385	0.0766	0.0017
Condiciones extraordinarias con camino	0.0559	0.1172	0.0032

**Tabla 4** Altura de ola promedio referida al nivel de bajamar media inferior para los 5 visores

## Conclusiones

A partir de los resultados descritos, se plantean las siguientes conclusiones.

Las alturas de ola en condiciones normales de oleaje con nivel de bajamar media inferior no es mayor a 15 cm y alcanza un máximo de 44 cm por lo que las obras de protección deberán ser diseñadas para estas alturas de ola.

No se presenta agitación significativa en relación a altura de ola dentro de la laguna costera, por lo que las obras de protección que cubren el terraplén del camino pueden a forma de sugerencia ser de elementos de roca con dimensiones y peso promedio cuyo cálculo puede ser efectuado por el método de Hudson (1956).

Se recomienda hacer un estudio con mayor tiempo de simulación (alrededor de 6 meses) para observar la influencia de otros fenómenos meteorológicos como nortes y lluvias que presentan mayor tiempo de incidencia en una región.

## Referencias

Berkhoff, J.C..W (1972) "Computation of combined refraction-diffraction", Jour. Int. Conf. on Coastal Eng., Vol 13, pp. 471-490

Fuentes, M.O. (1996) "Propagación del oleaje en la proximidad de la costa", UNAM, Tesis Doctoral.

Herrera, I.E. (2009) "Acoplamiento de modelos eulerianos-lagrangeanos para el estudio del transporte de sedimentos en la interacción océano-continente. Aplicación a regiones costeras del Golfo de México", UNAM, Tesis Doctoral

Herrera, I.E., Gasca, J.R., Galván A. y Moreno, J.Y. (2015) "Solución Numérica de la Ecuación de la Pendiente Suave y su Aplicación en el Diseño de las Obras de Protección de una Marina Náutica en Nayarit México", Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos UTSOE.

Lee, J.J. (1971) "Wave-induced oscillations in harbors of arbitrary geometry", Jour. Fluid Mech., Vol. 45, pp. 375-394

Maa, J., Maa, M.H., Li, C., and He, Q. (1997) "Using the gaussian elimination method for large banded matrix equations", Special scientific report Num. 135, Virginia Inst. Of Marine Science.

Panchang, V. and Pearce, B. (1991) "Solution of mild-slope wave problem by iteration", Jour. Applied Ocean Research, Vol. 13, pp. 187-200

Unluate, U. and Mei, C.C. (1973) "Long wave excitation in harbors an analytical study", Rep. Num. 171, Parson Lab. MIT, Cambridge, Mass.