



# Modelo experimental de fondo móvil para determinar la evolución de un perfil de playa

## Experimental model of a movable bottom to determine the evolution of a beach profile

Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros<sup>1</sup>, Cindy Casas Valencia<sup>1</sup>, Karla Monserrat Virrueta Sánchez<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Investigadoras del Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera, Km12+000 Carretera 431 El Colorado-Galindo, San Fandila, Pedro Escobedo, Querétaro. C.P.76700.

<sup>2</sup> Alumna de Ingeniería Civil, Instituto Tecnológico Superior de Uruapan. Carretera Uruapan-Carapan N°5555 La Basilia, Uruapan, Michoacán CP.60015.

### Historial

Manuscrito recibido: 27 de noviembre de 2023

Manuscrito aceptado: 25 de septiembre de 2024

Manuscrito publicado: diciembre 2024

### \*Autor para correspondencia

Karla Monserrat Virrueta Sánchez

e-mail: ic.karlmonserratvirrueta18@itsuruapan.edu.mx

ORCID:

### Resumen

En este trabajo se desarrolló un modelo hidráulico en el Instituto Mexicano del Transporte para revisar el efecto de las diferentes características del oleaje en las secciones transversales de playa. Se determinó el cambio en la geometría de un perfil de playa debido al oleaje, analizando los principales efectos e impactos, y se identificó su comportamiento ante las diferentes condiciones de oleaje en relación con las características del sedimento. Se utilizaron diferentes metodologías para realizar pronósticos de evolución de perfiles de playa y se seleccionó uno con base en estudios de campo para construir el modelo hidráulico. Se calculó el retroceso de la línea de playa en el perfil, y con los resultados se realizó un análisis.

**Palabras clave:** Perfil de playa, modelo fondo móvil, Procesos costeros.

### Introducción

Las costas están constituidas por material sólido e intersticial con sustancias como agua y sales contaminantes orgánicas e inorgánicas. Estos materiales están expuestos constantemente al embate del clima marítimo (oleaje, corrientes, y vientos), lo que genera los ambientes costeros (ONU, 2015). El oleaje es la forma más evidente de energía en los océanos, éste depende principalmente de parámetros atmosféricos, morfológicos, e hidrodinámicos, que influyen proporcionalmente en las costas generando una reacción con el transporte de sedimentos, por lo que el conocimiento de estos conceptos es indispensable en este estudio, enfatizando que estas variables

### Abstract

In this report, a hydraulic model was developed at the Mexican Transport Institute to review the effect of different wave characteristics on beach cross sections. The change in the geometry of a beach profile due to waves was determined, analyzing the main effects and impacts, and the behavior of the beach profile under different wave conditions in relation to the characteristics of the sediment was assessed. Different methodologies were used to make beach profile evolution forecasts and a beach profile was selected based on field studies to build the hydraulic model. The retreat of the beach line in the profile was calculated, and an analysis was carried out with the results.

**Keywords:** Evolution beach profile, Physical model, Coastal process.

son importantes para comprender mejor los procesos costeros en los litorales.

Las características y evolución morfológica del perfil de playa, son determinantes para una gestión eficiente de la zona costera (Bernabeu, 2001). El perfil de playa es el fundamento teórico de modelos hidrodinámicos con disipación de oleaje en aguas someras, así como en modelos de corrientes litorales, su relación con el transporte de sedimentos, y la evolución de la línea de playa, como el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989) y en el perfil de playa el modelo SBEACH (Larson y Kraus, 1989).

La simulación física y numérica del transporte y

corrientes litorales es lo que define la ingeniería de costas. Para realizar el planteamiento se requiere simplificar del sistema el perfil de equilibrio en que se encuentra, tomando en cuenta algunos de los aspectos geológicos, dando mayor importancia a la hidrodinámica.

En el estudio de los procesos costeros, se realiza una simplificación tomando en cuenta de forma independiente, el transporte transversal y longitudinal de sedimentos, lo que permite utilizar y trabajar en dos escenarios morfológicos: la línea de playa en planta y el perfil o sección transversal de playa.

En general todas las secciones transversales de playa tienen una disposición similar, ya que encontramos una pendiente más pronunciada en la zona cercana a la línea de playa y una pendiente más suave conforme nos alejamos de la parte continental. Dicha similitud permite el pronóstico de la evolución del perfil de playa con modelos matemáticos, así como la obtención o aproximación del perfil de equilibrio.

El perfil de equilibrio es la forma de un perfil de playa que se obtiene con modelos numéricos al someterlo a la acción del oleaje (altura de ola y período), y tomando en cuenta que dicho perfil está compuesto con material de un determinado diámetro. El primer supuesto de este concepto es que hay una respuesta al oleaje incidente y a las características sedimentológicas del perfil llegando a una sección que no varía con el tiempo, considerando que el transporte transversal de sedimento promediado en el tiempo es nulo.

De acuerdo a lo anterior, en la realidad no existe un perfil de equilibrio estático ya que el oleaje, la marea y las corrientes varían y cambian en el tiempo, así como el material que conforma dicho perfil; las características de oleaje y sedimentológicas están delimitadas a determinadas condiciones, los cambios en el perfil están limitados; al perfil de playa que se presenta con mayor frecuencia se le considera el perfil de equilibrio dinámico de la playa. Las principales aplicaciones de este concepto son:

1. Impacto de cambios en las variables. Es un instrumento para medir el impacto de los agentes inductores llámense oleaje y corrientes, y su relación con las características sedimentológicas en el perfil de playa y su influencia en la pendiente y forma del perfil.
2. Modelo de predicción. Al establecer dichas relaciones se puede pronosticar el comportamiento de un perfil de playa, lo que permite realizar análisis ante diferentes condiciones de oleaje incidente y de las características del sedimento, su principal utilidad es tomar en cuenta los cambios morfológicos en una

playa tanto cualitativa como cuantitativamente para el análisis del impacto y grado de influencia de los cambios en el oleaje y las corrientes.

## Materiales y métodos

### Modelo físico de fondo móvil

Con la finalidad de determinar el impacto en los cambios morfológicos en la geometría de los perfiles de playa ante los principales agentes inductores en el cambio de las secciones de playa, se realizó el modelo físico de fondo móvil, para la evolución de los perfiles de playa en el canal de olas del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT (Instituto Mexicano del Transporte).

Con la información del levantamiento de las secciones transversales de playa que se recopilaron de diversos sitios de estudio, se seleccionó un perfil de playa para la construcción del modelo físico (**Figura 1**).

### Selección de la escala de líneas

Para realizar la construcción del modelo hidráulico de fondo móvil en el canal de olas del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera es necesario garantizar la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo. De acuerdo a los requerimientos de construcción de éste tipo de modelos hidráulicos, es necesario realizar la distorsión más conveniente con el objeto de visualizar el fenómeno deseado, por lo que se procedió a realizar la selección de las escalas de líneas horizontal y vertical.

La selección de las escalas de líneas con las que se construyó el modelo hidráulico en el canal de olas, se realizó considerando la configuración batimétrica del perfil de playa seleccionado, la relación entre las alturas de ola del prototipo y la capacidad de generación del oleaje de los equipos, el tirante máximo a representar y de las condiciones de oleaje a estudiar en el modelo hidráulico.

### Adecuación del canal de olas

Se llevó a cabo la construcción del modelo físico de fondo móvil para determinar la evolución geométrica del

**Tabla 1.** Escalas de líneas vertical y horizontal seleccionadas para la construcción del modelo físico en el canal de olas del Laboratorio de Hidráulica de Ingeniería de Puertos y Costas.

Escala horizontal (H)	Escala vertical (L)	Proporción
1:120	1:24	1v:5h

FUENTE: IMT (2023).

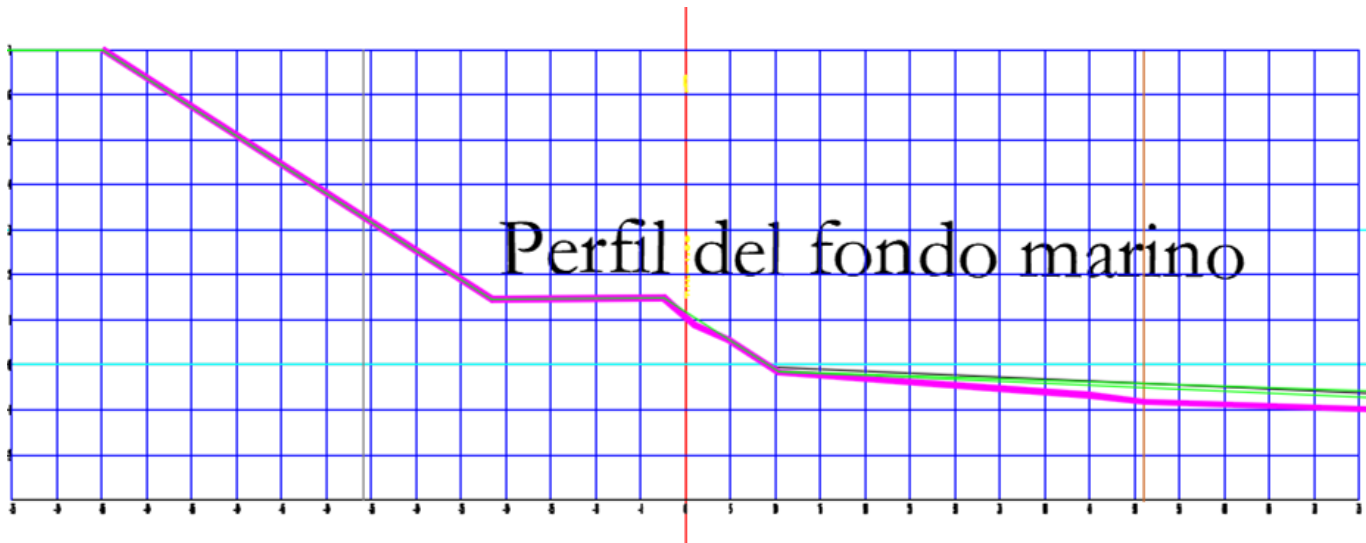


Figura 1. Perfil de playa seleccionado.

perfil de playa, en un canal de olas de 35 m de largo, 4.90 m de ancho y 1.20 m de profundidad que se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT. Para la construcción del modelo físico de fondo móvil, se tomó en consideración las escalas previamente seleccionadas y se realizó la adecuación del canal de olas siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- a) Retiro de la sección existente en el canal de olas (Figuras 2a y 2b).
- b) Trabajos de limpieza (Figura 2c).
- c) Trazo y colocación de un muro de tabique para retener la arena (Figura 2d y 2e).
- d) Trazo del perfil de playa en las ventanas de observación del canal de olas con la configuración batimétrica y topográfica de dicha sección (Figura 2f).
- e) Colocación, trazado y nivelación de las varillas para la configuración del perfil en el interior del canal de olas (Figuras 2g y 2h).
- f) Relleno y colocación a base de arena hasta los niveles indicados, para la configuración de la sección de playa (Figuras 2i y 2j).

**Programa de ensayo**

La programación de los ensayos en el modelo físico, se realizó con los resultados obtenidos en las modelaciones numéricas de la refracción del oleaje normal y extremal, donde se obtuvieron las diferentes alturas y periodos de ola del oleaje que incide en la zona de estudio para cada uno de los niveles de agua seleccionados, tal como se muestra en la **Tabla 2**.

**Desarrollo experimental**

Los ensayos en modelo físico, se realizaron en el canal de olas del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT a las escalas ya indicadas. Dichos ensayos se realizaron con oleaje irregular y en los extremos del canal de olas se colocaron taludes absorbentes para amortiguar el efecto de la reflexión del oleaje, cabe mencionar que el generador de oleaje cuenta con un sistema de absorción de oleaje que evita su reflexión.

Para la operación del modelo hidráulico, se utilizó una computadora PC en la cual se genera un archivo de señales digitales de oleaje irregular basadas en el espectro BRETSCHEIDER-MITSUYASU, estos datos se convierten a datos analógicos (variaciones de voltaje) y se envían a un generador de oleaje tipo pistón, como se

Tabla 2. Programa de ensayos.

Nivel (m)	Escala Horizontal [Ex]	Escala Vertical [Ey]	H (m)	T (s)	Duración (h)	Ensayo
0.00	1:120	1:24	1	6.39	12	1
			2	6.39	12	2
			1	8.60	12	3
			2	8.60	12	4
			1	11.01	12	5
			2	11.01	12	6

FUENTE: IMT (2023).



Figura 2. Adecuación del canal de olas.

indica en la **Figura 3**.

Para la medición de la altura de ola del modelo hidráulico, se utilizaron 2 sensores de oleaje tipo resistivo de  $\pm 5$  volts de resolución, colocados a una distancia de 1.5 veces la longitud de la ola frente al perfil de playa, esto con objeto de medir la altura de ola incidente. Adicionalmente, se colocaron 2 sensores de tipo capacitivo colocados en la orilla de playa del perfil playero, con la finalidad de medir las alturas de ola incidentes en esa zona (**Figura 4**).

Los ensayos en modelo físico de la evolución de los perfiles de playa se realizaron tomando en consideración las mismas alturas y periodos de ola que se indicaron en el programa de ensayos.

### Ensayos en modelo hidráulico de la evolución en el perfil de playa

Con objeto de determinar el cambio en el perfil de playa sujeto a las condiciones de oleaje previamente establecidas en los programas de ensayo, se llevaron a cabo las pruebas en modelo físico con la siguiente metodología:

1. Se representó en el modelo físico, el perfil de playa seleccionado, dejando el trazo de dicho perfil en las ventanas de observación del canal de olas con el objeto de tener identificada la línea original y poder tomar las mediciones del cambio que sufrió dicho perfil después de ser sometido al oleaje.
2. Se seleccionaron los puntos de referencia que se



Figura 3. Equipo utilizado para la generación, medición y análisis de oleaje.



Figura 4. Sensores de medición de oleaje colocados durante los ensayos en modelo físico para el registro de las alturas de ola generadas.

- midieron durante el desarrollo de los ensayos en el modelo físico para evaluar y comparar el cambio en la sección de playa (Figura 5).
- Se dio inicio con el nivel del mar (valor = 0) con el primer periodo de la ola, sometiendo al perfil de playa a las alturas de ola de 1 m y 2 m (prototipo) durante 12 horas cada una con la finalidad de completar las 24 horas (prototipo).
  - Se realizaron mediciones en los puntos de referencia seleccionados (Figura 5) cada 4 horas hasta completar las 24 horas (prototipo).
  - Posteriormente, al finalizar el lapso de 24 horas se reconstruyó el perfil de playa y se sometió nuevamente a las alturas de ola (1 m y 2 m prototipo), esta vez con el siguiente periodo de ola y así sucesivamente para todos los periodos de ola seleccionados.

### Resultados

En el canal de olas ancho del Laboratorio de Ingeniería portuaria y costera del IMT, se realizaron los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa con el nivel del mar 0 m, referido al Nivel de Bajamar Media (NBM). Dichos ensayos consistieron en someter la sección de playa durante 24 horas (prototipo) a las alturas de ola [H] de 1 m y 2 m (12 horas cada una) considerando cada uno de los periodos [T] establecidos (6.39 s, 8.6 s y 11.01 s) (Tabla 3).

En este apartado, se mostrarán las gráficas con los cambios que sufrió el perfil de playa en el modelo físico, al ser sometido a las condiciones de oleaje indicadas, así como las evidencias fotográficas que muestran dichos cambios.

### Ensayos en modelo físico con nivel del mar 0 m y periodo [T] de 6.39 segundos

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos

Tabla 3. Ensayos en el modelo físico del cambio del perfil de playa con nivel del mar de 0 m.

Período [T] (seg)	Altura de ola [H] (m)	Duración (h)
6.39	1 m	4
	1 m	8
	1 m	12
	2 m	16
	2 m	20
	2 m	24
8.6	1 m	4
	1 m	8
	1 m	12
	2 m	16
	2 m	20
	2 m	24
11.01	1 m	4
	1 m	8
	1 m	12
	2 m	16
	2 m	20
	2 m	24
	2 m	28
	2 m	32
2 m	36	

FUENTE: IMT (2023).

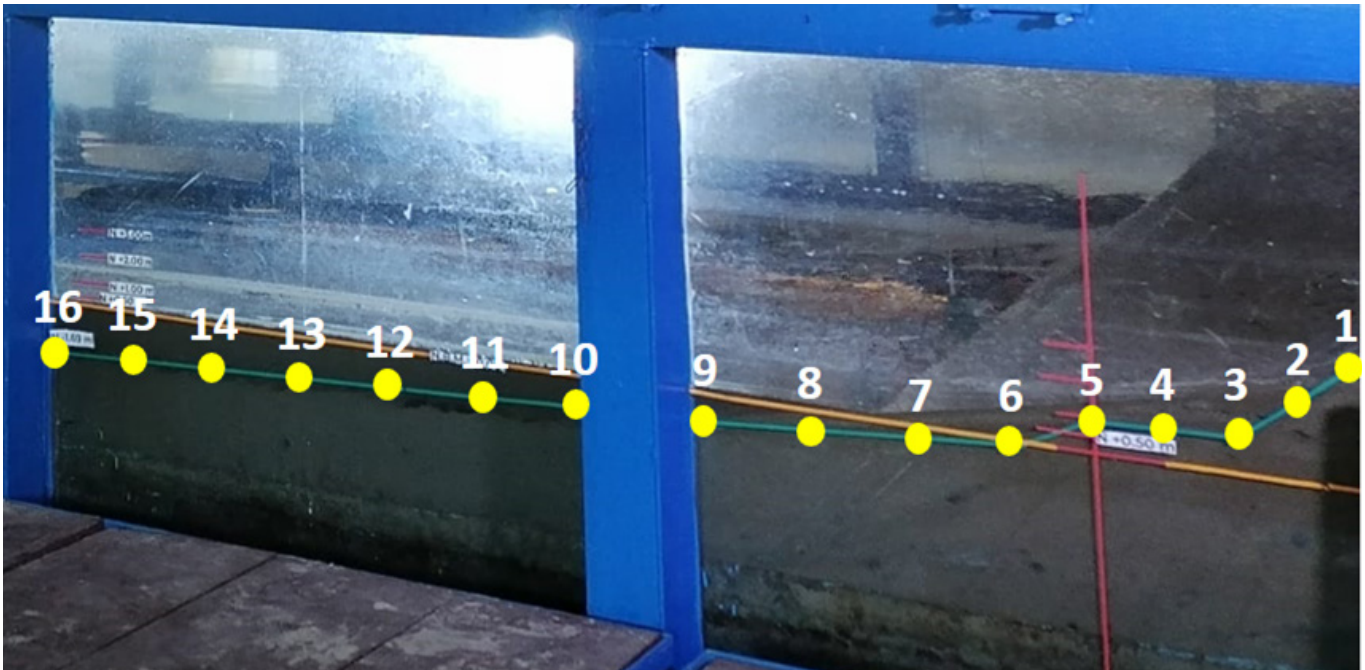


Figura 5. Puntos de control para las mediciones de los cambios del perfil de playa del modelo físico.

de los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control para el periodo de 6.39 s con nivel del mar 0 m, donde se puede observar el perfil inicial antes de ser sometido al oleaje (Figura 6a) y el perfil de playa a las 24 de horas de ser sometida a las condiciones de oleaje 12 horas con  $H = 1$  m y 12 horas con  $H = 2$  m y  $T = 6.39$  s (Figura 6b).

#### Ensayos en modelo físico con nivel del mar 0 m y periodo [T] de 8.6 segundos

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control para el periodo de 8.6 s con nivel del mar 0 m, donde se puede observar perfil de playa a las 24 de horas de ser sometida a las condiciones

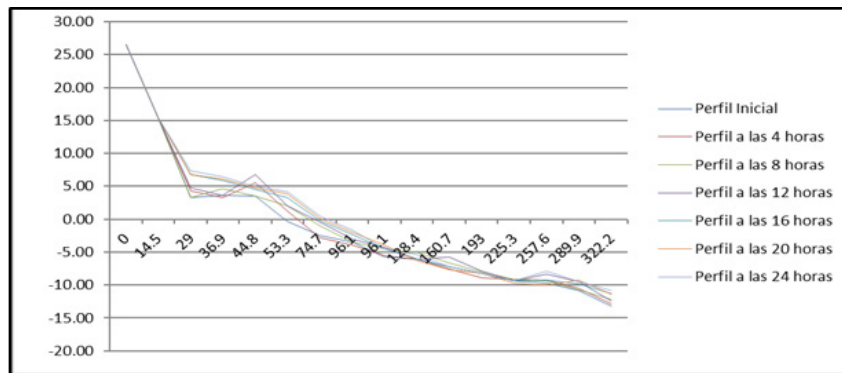


Figura 6. Resultados cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control, con nivel del mar 0 m y periodo de 6.39 s.

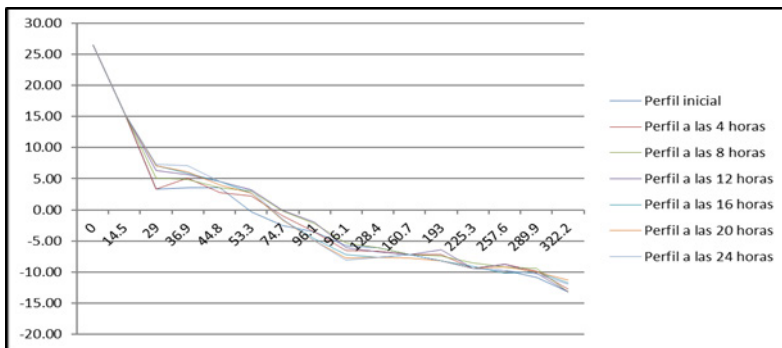


Figura 7. Resultados cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control, con nivel del mar 0 m y periodo de 8.6 s.

Tabla 4. Diferencias entre el perfil inicial y el obtenido para una altura de 1 m a las 12 h de duración.

Punto	Periodos (T)		
	6.39 s	8.60 s	11.01 s
1	0.00	0.00	0.00
3	+1.50	+3.00	+3.00
5	+3.30	+1.00	+4.50
6	+2.30	+3.50	+3.20
9	+1.50	-0.30	-1.40
10 a 12	0.00	0.00	0.00

FUENTE: IMT (2023).

de oleaje 12 horas con  $H = 1$  m y 12 horas con  $H = 2$  m y  $T = 8.6$  s.

**Ensayos en modelo físico con nivel del mar 0 m y período [T] de 11.01 segundos**

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos en los puntos de control de los ensayos en modelo físico del cambio del perfil de playa para el periodo de 11.01 s. Cabe señalar que, durante la realización de los ensayos en el modelo físico, se observó que el perfil de playa continuaba sufriendo modificaciones después de las 24 h, el cual se probó hasta 36 h donde se estabilizó.

**Discusión**

Como se puede observar en las gráficas mostradas en

Tabla 5. Diferencias entre el perfil inicial y el obtenido para una altura de 2 m a las 24 h de duración.

Punto	Periodos (T)		
	6.39 s	8.60 s	11.01 s
1	0.00	0.00	0.00
3	+4.00	+4.00	+4.80
5	+1.50	+1.00	+1.40
6	+4.50	+3.40	+4.00
9	+1.30	-2.70	-1.30
10 a 12	0.00	0.00	0.00

FUENTE: IMT (2023).

las Figuras 6, 7 y 8, las secciones tienen una variación con respecto al perfil de playa inicial, las diferencias se revisaron en los puntos 1, 3, 5, 6, 9 y de 10 a 12, para determinar el grado de impacto en la sección transversal, a continuación, se muestran las diferencias obtenidas para una altura de ola de 1 m a las 12 h de duración y para una altura de ola de 2 m para 24 h de duración (Tablas 4 y 5).

Se puede observar la relación que existe entre los diferentes periodos y alturas de oleaje en la geometría del perfil de playa y su variación, se observa también que, de acuerdo con la literatura, a mayor periodo, mayor es el cambio, también se observa que después de los puntos 10 a 12, ya no tienen efecto la altura y el periodo del oleaje en la pendiente del fondo.

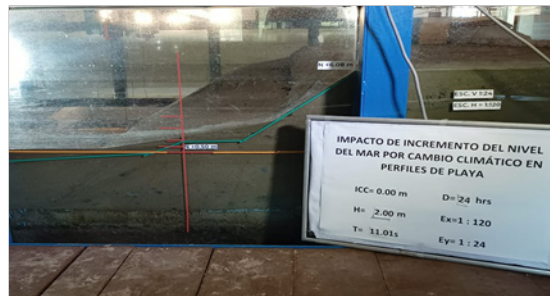
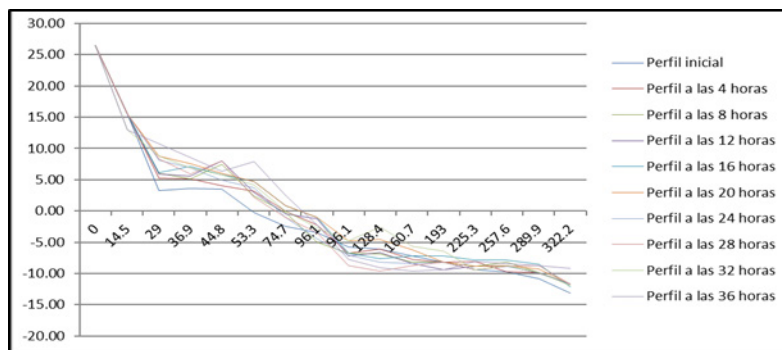


Figura 8. Resultados cambio del perfil de playa en los 16 puntos de control, con nivel del mar 0 m y periodo de 11.01 s.

### Conclusiones

El modelo de fondo móvil para determinar la evolución de un perfil de playa sirvió para representar físicamente la relación que existe entre la altura y periodo del oleaje con las características de los sedimentos que conforman una playa y la variabilidad en su geometría de acuerdo a estas características, también se observó que existe un punto en la sección donde estas variables ya no tienen un efecto en la pendiente, se observó también la formación de rizos en el fondo, los cuales también tienen un patrón relacionado con la distancia y la profundidad de la sección y con el inicio de movimiento del sedimento, cabe señalar que este efecto sólo se estudió tomando en cuenta el nivel medio del mar, lo que lleva a proponer como una línea de investigación, el realizar el estudio para diferentes niveles del mar y estudiar la influencia de esta variable en la geometría de un perfil de playa.

### Agradecimientos

A Karla Virrueta Sánchez por su valiosa participación en este estudio, al Instituto Mexicano del Transporte, que fomenta la investigación de temas portuarios y costeros y hace posible el desarrollo del estudio en sus instalaciones y con ello del presente artículo.

### Referencias

Bernabeu AM, Medina R, Vidal C, Muñoz-Pérez JJ (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de

equilibrio en dos tramos. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 14(3-4).

Alexandra T, Inigo J, Paula C (2016). Managing coastal erosion under climate change at regional scale, *Coastal Engineering*, US.

Bruun P (1988). The Bruun rule of erosion by sea-level rise: A discussion on large-scale two and three dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, USA.

Chatenoux B, Peduzzi P, Velegrakis V (2012). RIVAMP training on the role of coastal and marine ecosystems for mitigating beach erosion: The case of Negril Jamaica, UNEP/GRID-Geneva, Geneva, Switzerland.

Larson M, Kraus NC (1998). SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, USA Army Corps of Engineers, USA.

Marcel J, Huib J (1995). Modelling shoreface profile evolution. *International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics*, USA.

Dean RG (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, USA.

Tsanakas K, Poulos SE, Monioudi I (2017). Sea level rise impact in the beach zone of Katerini región NW Aegean Sea, 15th International Conference on Environmental Science and Technology, US.