A tropical beach scene with a white sandy shore, lush green palm trees and vegetation on the right, and clear turquoise water extending to a blue horizon under a bright blue sky with scattered white clouds. A small boat is visible in the distance on the left.

# **Modelos de transporte en sedimentos por oleaje y su aplicación a diferentes escalas de tiempo**

**José Antonio González Vázquez  
Jair Del Valle Morales  
Eugenio Gómez Reyes  
Universidad Autónoma Metropolitana  
Unidad Iztapalapa**

## Resumen

El presente trabajo tiene la finalidad de establecer las características más importantes de tres modelos numéricos que simulan transporte de sedimentos por oleaje en la costa, siendo este el proceso natural más significativo. Considerando una clasificación temporal de las soluciones, se presentan y caracterizan tres modelos numéricos: de corto, mediano y largo plazo. En un caso de estudio se establecen los límites de aplicación, los comportamientos esperados, las tendencias del sistema y las desventajas de cada modelo. Dentro de los límites de aplicación establecidos para los modelos, se generan resultados de una calidad adecuada. Esto, si las condiciones iniciales y la información con la que se cuenta de la zona de estudio son confiables, ya que permiten una correcta representación del lugar de análisis y calibración del modelo.

## Abstract

The scope of this work is to establish the most important parameters of 3 numerical models that represents the transport of sediments on the shore, being this, the most important natural process. Taking into account the time dependent classification of the solutions, 3 models are presented and characterized: short, medium, and long term. In a study case, the limits of application are defined, and also the tendencies of the system, and disadvantages of each model. Results are generated within the limits of application of the models, and the obtained results have good quality. If the initial conditions and the information of the coastal zone are reliable, the representability will be correct.

## Palabras clave

Transporte de sedimento, oleaje, XBeach, Delt3D, Oneline

## Introducción

El aprovechamiento responsable, la protección y restauración de la zona costera es de gran importancia para México. En esta franja se desarrollan actividades económicas estratégicas de las cuales depende el país, por citar algunas, están las asociadas al turismo, la energía, el comercio y la pesca. La franja costera, particularmente la zona litoral, es un área extremadamente cambiante en el tiempo y en el espacio. Esto debido principalmente a que diferentes factores controlan su equilibrio (i.e., geología subyacente, tipo de sedimentos, volumen y balance sedimentario, condiciones climáticas y oceanográficas).

Las playas son sistemas dinámicos con diferentes estados de equilibrio temporales. Cuando existe un desbalance temporal de sedimento entre las entradas y salidas de la celda litoral, el transporte de sedimentos origina los cambios en la morfología de la playa. En un evento climático extremo, las playas pueden variar su perfil transversal y con ello su ancho visible en cuestión de horas o días, como resultado de un movimiento de arena hacia la zona sumergida en forma de barras, causado por la acción combinada del transporte eólico, corrientes, marea de tormenta, pero principalmente por la acción del oleaje. Ante un estado de oleaje en condiciones normales de clima, las barras serán parte del sedimento depositado nuevamente en la playa emergida, estableciendo así, una condición dinámica de equilibrio de sedimentos espacio-temporal.

Tomando en cuenta la mejora en los sistemas de cómputo en el área de la investigación, la modelación numérica es una alternativa para la predicción de la morfología de las playas. Actualmente existe un gran número de modelos que

buscan representar determinados efectos físicos dentro de la dinámica litoral, como las condiciones de oleaje y corrientes, marea de tormenta, vientos, fuentes y sumideros de sedimentos; o modelos que son una herramienta para un problema particular. En el caso de los modelos que buscan reproducir el transporte de sedimentos en las playas, su desarrollo tiene como principales dificultades la variación en las escalas temporales y las condiciones tridimensionales de los procesos hidrodinámicos y morfológicos.

El estudio de la morfodinámica de playas involucra una gran cantidad de efectos y procesos físicos. Siguiendo a Ávila (2007), los procesos y factores físicos pueden representarse como efectos climáticos (marea, viento, oleaje), actuando sobre condiciones locales (composición geológica, aportes de sedimentos) en presencia de procesos derivados entre ambos (refracción, rotura y corrientes). Estos no son representados en su totalidad por las formulaciones deterministas o empíricas. Sin embargo, se busca analizar el mayor número de efectos, tal que sea posible predecir el comportamiento de la playa con la menor incertidumbre.

En lo que respecta a los efectos tridimensionales de los procesos físicos, se establecen dos modos de análisis direccional, que se consideran independientes en una determinada dinámica temporal, las direcciones correspondientes son el perfil y la planta de la playa. Consecuentemente, se consideran 2 tipos de transporte de sedimentos longitudinal y transversal. El transporte longitudinal (asociado a periodos largos) se considera paralelo a la línea de costa y el transporte transversal (asociado a eventos cortos) se considera perpendicular a la línea de costa. El trans-

porte de sedimentos origina los cambios en la morfología de la playa como resultado de un desequilibrio del sedimento a través del tiempo.

Dentro del estudio temporal de la dinámica de playas, es necesario involucrar la mayor cantidad de procesos físicos que generan los cambios morfológicos. Estos procesos pueden ser efectos de corto plazo, como los eventos extremos; y efectos de largo plazo asociados a las tendencias geológicas (Ávila, 2007). Los efectos pueden representarse por medio de un modelo numérico, sin embargo, actualmente no existe un modelo aplicable en todas las escalas de tiempo debido principalmente a las hipótesis planteadas en los métodos de solución de las ecuaciones de gobierno. Así, los modelos que buscan predecir la evolución morfológica se pueden catalogar de acuerdo con Hanson y Kraus (1989) por el tiempo de análisis, longitud de costa y tipo de transporte ( Figura 1).

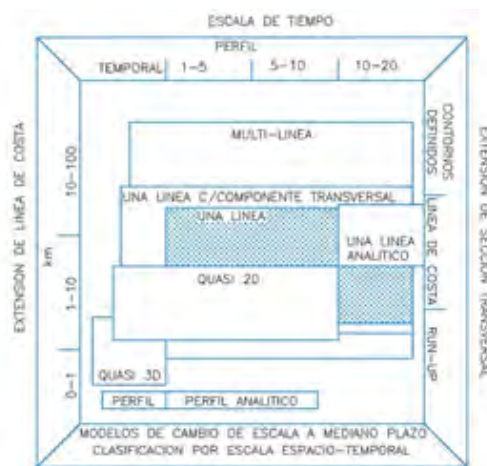


Figura 1. Clasificación espacial y temporal de los modelos de cambio de playa (Hanson y Kraus, 1989).

Los modelos pueden clasificarse en modelos de bucle cerrado y en modelos de bucle

abierto. Los de bucle cerrado están basados en formulaciones de equilibrio, en las que el perfil de playa tiende a un estado de equilibrio y se emplean para lapsos de tiempo largo. Los modelos de bucle abierto modelan procesos físicos en escalas pequeñas de tiempo, que no tienen y no tienden a un perfil de equilibrio orientado. Entonces, los modelos que buscan predecir el comportamiento de la costa mediante la evolución del perfil transversal, únicamente pueden ser utilizados en periodos cortos de tiempo (horas-días) ya que estos pueden desestabilizarse y generar resultados no adecuados.

Con esta clasificación de los modelos, y considerando la importancia de entender su aplicabilidad temporal, en este trabajo se describen y aplican 3 modelos para diferentes escalas temporales, sus principales elementos y sus características más importantes para su aplicación apropiada.

## Objetivo

Caracterizar tres modelos de transporte de sedimentos por oleaje para diferentes escalas de tiempo.

## MODELOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR OLAJE

**MODELOS DE CORTO PLAZO.** Las condiciones que representan los modelos de corto plazo son para la evolución del perfil de la playa y están enfocadas para predecir la evolución originada por el transporte transversal de sedimentos (en dirección perpendicular a la costa). La mayoría de los análisis son para los efectos que provocan eventos extremos o estacionales (por ejemplo, el paso de un huracán, o la época de huracanes, un frente frío, o la

época de frentes fríos).

Para la condición de transporte transversal de sedimentos ocasionado por eventos extremos, se analizan las condiciones de perfil de tormenta y perfil de acreción.

El perfil de tormenta se forma al inducir un oleaje con energía mayor a la significativa (el oleaje significativo se refiere a las condiciones de altura y periodo de la ola representativos del lugar), que produce erosión en la parte emergida y provoca un transporte hacia la zona sumergida. El material transportado se sitúa alrededor del punto de rotura del oleaje formando barras. Debido a la erosión de la berma y formación de la barra se produce un cambio de la pendiente de la playa, haciéndose más tendida, lo que tiene como resultado un cambio en la costa.

El perfil de acreción se interpreta como la recuperación del perfil de la playa debido a la asimetría del oleaje. El oleaje incidente actúa sobre los depósitos sumergidos y los transporta hacia la costa aumentando la pendiente del perfil, generando una playa con una amplia berma y sin caracteres submarinos. La concentración de sedimento está relacionada con la generación de movimiento turbulento, que depende de la rotura de las olas. Por tanto, la cantidad de material disponible para el transporte está relacionada con la disipación de energía producida por la rotura de las olas (Kriebel y Dean, 1985). Del mismo modo, la magnitud del transporte principalmente en la zona de surf (zona de rompientes) se relaciona con la disipación de energía por unidad de volumen de agua.

En general, los perfiles donde se desa-

rollan las barras (proceso erosivo), son de dirección predominante del transporte hacia el mar. Mientras que los perfiles donde se desarrollan bermas (proceso de acreción), son de dirección predominante del transporte hacia la costa.

De acuerdo con Larson et al. (1990) las características de un modelo transversal son:

- Simulaciones confiables y precisas del cambio en la playa con datos disponibles en proyectos de ingeniería habituales.
- Representación del transporte de sedimento y cambios en la playa en escalas de interés para el desarrollo de la ingeniería.
- Representación general de las condiciones de frontera y configuración de estructuras. - Cálculos robustos, lo que significa que las incertidumbres presentes en los proyectos no presentan resultados erróneos.
- Poco tiempo de ejecución.

#### MODELOS DE MEDIANA ESCALA.

En lo que respecta a los eventos estacionales, los cambios son producidos por las variaciones de acumulación de sedimento en el verano y de la erosión en invierno. Los modelos morfodinámicos de medio plazo describen, fundamentalmente, las variaciones del fondo y su escala de tiempo es muy próxima a la de los procesos hidrodinámicos. Sus resultados no son extrapolables a escalas de tiempo superiores o menores, debido a que la variación en el perfil transversal puede generar una mayor incertidumbre. La mayor parte del proceso está ligada al transporte longitudinal

asociado a oleaje regular (transporte a lo largo de la playa, pero no en dirección perpendicular a ésta).

**MODELOS DE LARGO PLAZO.** Para pronosticar el comportamiento de la costa y sus características esenciales en periodos de años y décadas, considerando la clasificación de Hanson y Kraus (1989), se establecen los modelos de una línea como los más apropiados. Estos modelos simulan las características en planta de las playas por medio de la determinación de la línea de costa. En los modelos de una línea, modelos de bucle cerrado, la evolución de la línea de costa es producto del transporte longitudinal de sedimento en función del oleaje, profundidad de cierre y del tiempo. Se considera que el perfil de playa es un perfil de equilibrio de Dean, (ya que no cambia de forma y solo se traslada paralelamente a si mismo hasta la profundidad de cierre, (Hanson y Kraus, 1989), ver Figura 2. En otras palabras, un perfil de Dean es un perfil sujeto a una condición de oleaje estacionario, donde los cambios que se presentan en el tiempo son muy pequeños y pueden despreciarse (Dean, 1977). En el perfil de playa constante en el tiempo no se considera el transporte transversal de sedimento, por lo tanto, los modelos de una línea son incapaces de estimar los cambios locales de la topografía de fondo (es decir, la batimetría). Por lo tanto, no pueden ser utilizados en escalas de corto plazo.

Las hipótesis principales que se consideran de acuerdo con Hanson y Kraus, 1989.

- El perfil de playa es constante en el tiempo y el espacio. Debido a que no se tiene en cuenta el cambio experimen-

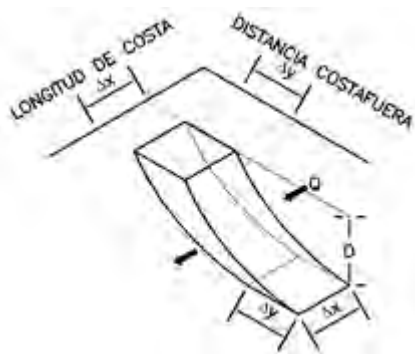


Figura 2. Perfil de Dean para un modelo a largo plazo. Los incrementos  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  son anchos espaciales, la profundidad de cierre  $D$ , la variación del gasto  $Q$  es únicamente longitudinal.

tado por el perfil de playa estos modelos no pueden ser aplicados en el medio plazo. Además, en zonas donde los efectos de refracción-difracción son dominantes, es necesario contar con el cambio espacial del perfil de playa.

- De acuerdo con Hanson y Kraus, 1989, el límite en la costa está marcado por la elevación de la berma y en el mar por la profundidad de cierre ( $D$ ).
- El transporte longitudinal de sedimento solo se produce por la rotura del oleaje.
- La estructura detallada de la circulación costera se ignora.
- Existe una tendencia de largo plazo en la línea de costa.

De la clasificación anterior se establecen tres modelos para su aplicación. El modelo XBeach (Roelvink et al., 2009) para corto plazo, el modelo Delft3D (Lesser et al. 2009) también de corto plazo, pero que puede ser aplicado para escalas estacionales o de mediano plazo y el modelo GENESIS

(Hanson y Kraus, 1989), modelo de una línea y empleado para largo plazo. De acuerdo con (Baart et al., 2012) es posible establecer estos modelos considerando sus escalas temporal y espacial ( Figura 3).

XBeach es un programa numérico de código abierto desarrollado por la UNESCO-IHE, *Delft University of Technology*, Deltares y la Universidad de Miami, escrito en Fortran 90/95.

XBeach es un modelo morfológico en 2D desarrollado para evaluar la respuesta costera ante las condiciones variantes en el tiempo, debido a huracanes y tormentas, incluida la erosión en las dunas, *overwash* (parte del oleaje que avanza y rebasa la cresta de la berma o de una estructura y que ya no regresa hacia el mar o lago) y rotura del oleaje. La transformación de la ola de corto periodo es por medio de un enfoque de segunda generación, que considera la distribución direccional de la ola asumiendo que el espectro es representado por su frecuencia media, resuelve las condiciones de refracción y variación de la onda en los planos horizontales y puede ser usado para simular la propagación de grupos de olas. Para ondas largas emplea las ecuaciones de aguas someras.

El transporte de sedimentos es desarrollado por las ecuaciones de advección-difusión, con una concentración de sedimento promediada sobre la vertical, relacionando la variación vertical de la velocidad con la no linealidad de la onda causada por los procesos físicos. La variación de la concentración de sedimentos se adapta gradualmente a los cambios de condiciones hidráulicas mediante una escala de tiempo para el arrastre de sedimentos.

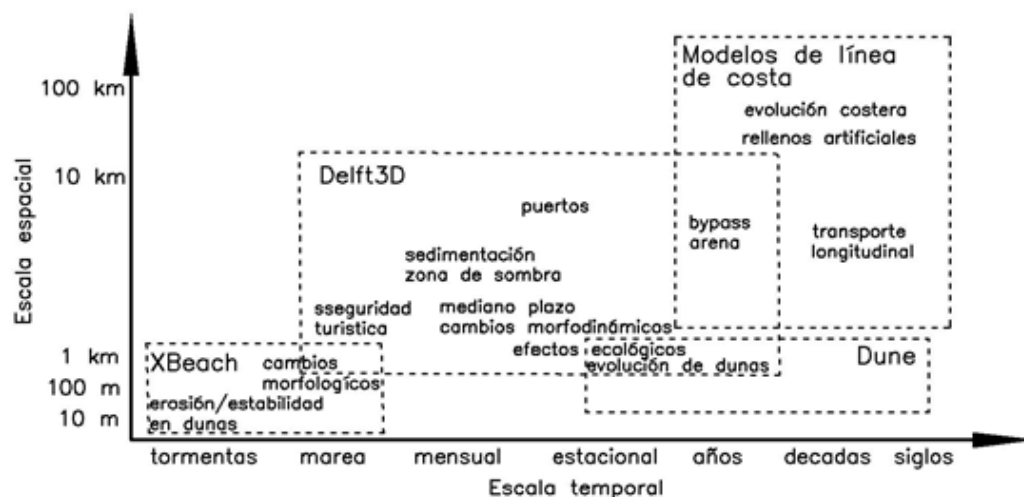


Figura 3. Escala espacial y temporal para los procesos hidrodinámicos de los modelos Xbeach, Delft3D y modelos de una línea, (Baart et al., 2012).

El arrastre o deposición de sedimentos se determina por la falta de correspondencia entre la concentración de sedimento y la concentración de equilibrio que representa el término fuente en la ecuación de transporte de sedimentos. El modelo puede ser empleado para el cálculo del *swash* (avance ascendente de agua hasta la playa después de que una ola rompe.), *overwash* (parte del oleaje que avanza y rebasa la cresta de la berma o de una estructura y que ya no regresa hacia el mar o lago) y *avalanching* (derrumbe de dunas) durante la erosión e inundación (Roelvink et al., 2009).

Delft3D es un modelo numérico para climas costeros compuesto de varios módulos, entre los cuales están FLOW, WAVE, MOR (incluido en el FLOW). El módulo FLOW resuelve el comportamiento hidrodinámico ya sea promediado sobre la vertical o en un sistema 3D, en una malla/grid rectilínea o curvilínea. Para la simulación del oleaje aleatorio, generación de oleaje por viento, análisis en lagos, estuarios, se emplea un modelo de tercera

generación SWAN, (SWAN es un acrónimo para *Simulating WAVes Nearshore*).

Los módulos WAVE y FLOW son acoplados para trabajar de forma paralela, en intervalos regulares, con la interacción entre los flujos y el transporte de sedimento. En general el modelo puede describirse como: la interacción en la que el módulo FLOW, y las corrientes de descarga que analiza, se conjunta con el módulo WAVE de oleaje para el análisis de transporte de sedimentos en el módulo MOR. El comportamiento del sedimento es analizado por las ecuaciones de advección y difusión. El transporte de sedimento analiza condiciones por arrastre de fondo, por suspensión de sedimentos para suelos no cohesivos y transporte por suspensión para sedimentos cohesivos (Lesser et al., 2009).

Por otra parte, el modelo Delft3D es considerado un modelo de mediano plazo. Condiciones físicas y numéricas bien establecidas puede generar buenos resultados para eventos extremos y de corto plazo.

Se obtienen resultados muy similares a los obtenidos por XBeach (Trouw et al, 2012). Lo que se atribuye a sus módulos de propagación de oleaje y de turbulencia, así como a los criterios que considera para el transporte de sedimentos y la evolución al análisis en tres dimensiones. Es evidente que para lograr esta aproximación el modelo deberá ser correctamente calibrado. En general el modelo Delft3D es aplicable también a condiciones similares al modelo XBeach. Trouw et al. (2012) obtuvieron las características siguientes para ambos modelos:

- Existe una buena correspondencia entre las ondas incidentes y el transporte longitudinal de sedimentos.
- El modelo Delft3D es ideal para modelar corrientes y olas; sus resultados pueden ingresarse en el modelo XBeach.
- El transporte longitudinal de sedimentos con el modelo Delft3D es una buena aproximación.
- Para que los resultados sean adecuados, es indispensable emplear el modelo Delft3D en condiciones 3D y no usar una modelación 2D.
- Ambos modelos pueden considerar estructuras de protección costeras (por ejemplo, espigones y rompeolas en sus diferentes tipologías).

GENESIS. El modelo Genesis (Hanson y Kraus 1989) está basado en la teoría de los modelos de una línea. El modelo buscaba implementar la teoría base propuesta por Pelnard Considère (1956). La ecuación del transporte longitudinal de sedimento fue modificada para incluir los gradientes

de transporte longitudinal en la altura de ola. De lo anterior, es posible estimar el transporte de sedimento cerca de las estructuras considerando la difracción del oleaje, los efectos de muelles y espigones normales a la línea de costa.

Las teorías básicas de los modelos de una línea permiten representar la evolución de la playa a largo plazo, sin embargo, los efectos de corta duración que en su mayoría generan transporte transversal de sedimentos no son presentados (por ejemplo, los efectos de acreción y erosión de playas por los ciclos estacionales). Considerando que los modelos de una línea no proveen información del perfil de la playa en el corto plazo, es necesario analizar el transporte transversal de sedimentos mediante un modelo independiente. El perfil constante de la playa influye en gran medida en zonas donde las condiciones de refracción y difracción son las dominantes. La descripción adecuada de estas zonas requiere tener en cuenta el cambio espacial del perfil de playa.

## CASO DE APLICACIÓN

Para la aplicación de los modelos XBeach, Delft3D y GENESIS se realiza considerando la batimetría y topografía de la Figura 4. El área aproximada es de 2 km<sup>2</sup> aproximadamente. El valor de la densidad del sedimento es de 2650 kg/m<sup>3</sup>, con diámetros  $d_{50} = 0.00023m$  y  $d_{90} = 0.0003m$ . El área de análisis se dividió considerando mallas de 20m por 20m para los modelos XBeach y Delft3D. Para el modelo GENESIS se considera un espacio entre datos de 10 m.

Sobre la batimetría del caso de aplicación. Los contornos batimétricos son paralelos



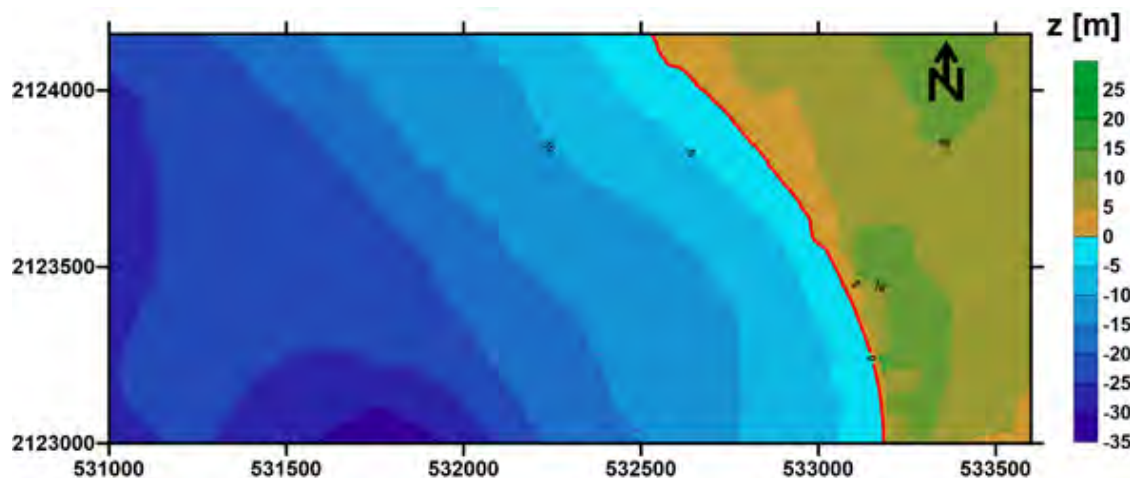


Figura 4. Batimetría y topografía de estudio. Las líneas topobatimétricas son las que se generan al pasar de un color azul oscuro a uno más claro

a la costa, lo cual reduce el cambio de dirección sobre el oleaje por efecto del fondo (refracción del oleaje), considerando que el oleaje incidente es en dirección de oeste hacia este. El dominio de estudio contiene también zonas con profundidades tan grandes que no disminuyen la energía del oleaje por fondo durante su propagación (condición de aguas profundas), para las condiciones de oleaje propuestas. La configuración del dominio permite evaluar el comportamiento del oleaje desde aguas profundas la costa donde se presentan fenómenos como la rotura del oleaje.

Para el modelo XBeach se emplearon las siguientes condiciones. Tiempo de simulación 18000s (5 horas), espectro de oleaje JONSWAP con altura de ola  $H = 4m$ ; periodo de oleaje como frecuencia de  $f_p = 0.11/s$  y dirección de incidencia del oleaje oeste-este. Estas condiciones de oleaje y tiempo de simulación se consideran para una tormenta, por lo que es un valor mayor al significativo y debe asociarse a periodos de retorno o valores máximos en registros de oleaje.

En los resultados presentados de la Figura 5a, las condiciones de oleaje  $H_{rms}$  (altura de ola media cuadrática) determinan las alturas más próximas a la costa, que, en conjunto con las condiciones de rotura, serán fundamentales para el transporte transversal de sedimentos. En la Figura 5b se muestra la simulación del transporte de sedimentos después de 5 horas. Se observa erosión en la costa, así como la variación del fondo producida por el oleaje incidente.

Los resultados obtenidos mediante XBeach, para una condición de tormenta con duración de 5 horas, mostraron una erosión en la línea de costa y un retroceso de la berma, así como un transporte de sedimentos hacia mar adentro resultado del transporte transversal (Figura 6b). En general, el modelo obtiene condiciones de erosión en la proximidad de la costa y transporte de sedimentos en dirección costa fuera (Figura 6a), acorde con las magnitudes de oleaje para condiciones extremas aplicadas, perfiles de tormenta y de un sistema dominado por el transporte transversal.

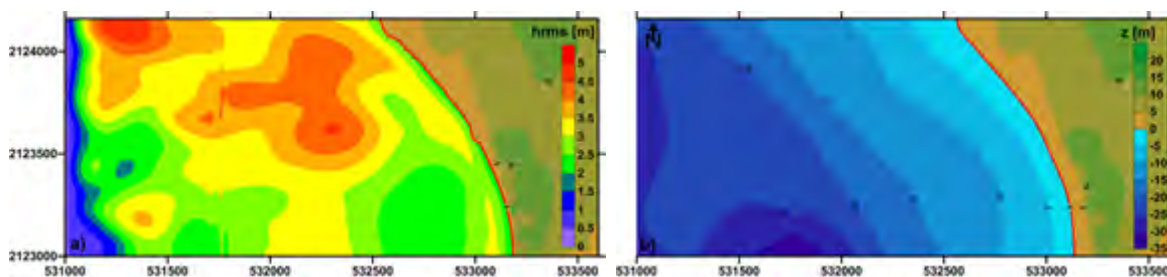


Figura 5. Modelo XBeach: a) Altura de ola  $H_{rms}$ ; b) condición final de batimetría después de 5 horas de simulación.

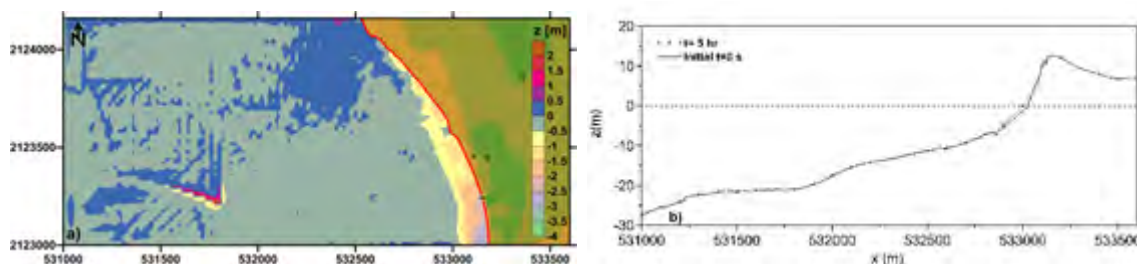


Figura 6. XBeach: a) condiciones de erosión y acreción para  $t = 5$  hr, b) Perfil transversal en la coordenada  $Y = 2123030$ , inicial ( $t = 0$  hr) y final ( $t = 5$  hr).

Los análisis de XBeach son establecidos en periodos de corto de tiempo, por lo cual se espera que los perfiles transversales de la playa tengan un comportamiento no solo de tendencias sino muy próximos a los valores esperados, ya sea como estimación o como calibración ( Figura 6b). Las variaciones en el perfil transversal de la playa están en función de las condiciones de rotura del oleaje, transporte por fondo, tipo de oleaje, propiedades del sedimento, parámetros numéricos como el número de Courant, dirección de incidencia del oleaje, entre otros. El perfil de la playa muestra un transporte de sedimento de zona seca a zona sumergida, ocasionando un desplazamiento aparente de la costa (Figura 7). Se observan pérdidas de sedimento en zona seca que pueden formar barras próximas a la zona de rotura de la ola, acorde con el perfil de tormenta.

Para mejorar el resultado y establecer una correcta tendencia del sistema es fundamental la calibración del modelo, de no ser así únicamente pueden darse tendencias de transporte de sedimento. Por otro lado, es importante mencionar que existe una inconsistencia en la frontera oeste del sistema, que es una condición de inicio del forzante de oleaje (condición inicial). Entonces es necesario que las condiciones de frontera del modelo queden alejadas de la zona de interés.

Para el modelo Delft3D se emplearon las siguientes condiciones: Tiempo de simulación 30 días; espectro de oleaje JONSWAP con altura de ola  $H = 1m$ ; periodo de oleaje de  $T = 8s$ , dirección de incidencia de la ola este-oeste.

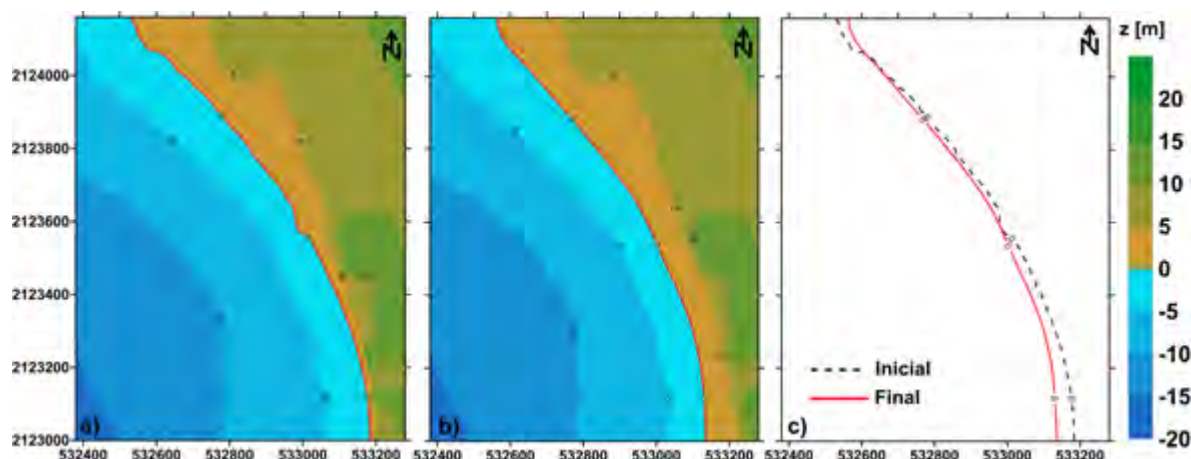


Figura 7. Modelo Xbeach. a) línea de costa inicial; b) línea de costa para  $t=5$  hr; c) variación entre líneas de costa.

De los resultados del modelo para un mes, la playa puede considerarse como estable, debido a que no presenta una alteración en la continuidad del sistema (Figura 8b). Los estados de oleaje mostraron una regularidad entre la dirección de su incidencia y su afectación a la línea de costa. Esto, ya que es un oleaje que se propaga en dirección perpendicular a la costa y que no sufrirá alteración por fondo hasta estar próximo a la costa, ocasionando un transporte este-oeste y de forma longitudinal en la costa (Figura 8a).

El transporte transversal, longitudinal, por suspensión y fondo depende de las condiciones de oleaje y por el tiempo de simulación los resultados de los perfiles tendrán mayor incertidumbre, sin embargo, las tendencias de transporte longitudinal en el mediano plazo si pueden ser bien representadas (Figura 9a,b).

El modelo puede considerarse estable en el mediano plazo. En particular las variaciones en la costa presentaron acumulación

de sedimento y pocas zonas de erosión, la tendencia se considera adecuada según las condiciones de oleaje no extremo u ordinario, así como su dirección de incidencia. El transporte de sedimentos es rigido por el transporte longitudinal, por lo que los resultados son acordes a la escala de tiempo (Figura 9b). Con las condiciones de oleaje en magnitud y dirección, se observa transporte de sedimento que favorece a la línea de costa (figura 9b). Esta situación se presenta a lo largo de la línea de costa de todo el dominio, por lo que, bajo condiciones aplicadas, consideradas regulares, si existe un incremento en la costa. Se determina que el modelo cumple con transporte de sedimentos favorable hacia la costa y con base a las condiciones de transporte longitudinal (Figura 10).

En el modelo GENESIS se emplearon las siguientes condiciones, tiempo de simulación de 1 año, oleaje regular con altura de ola  $H = 1m$ ; periodo de la ola  $T = 8s$ . El modelo se trabaja en un sistema operativo Windows XP, debido a que no existe una actualización. La evolución de la línea de costa en un año se considera estable

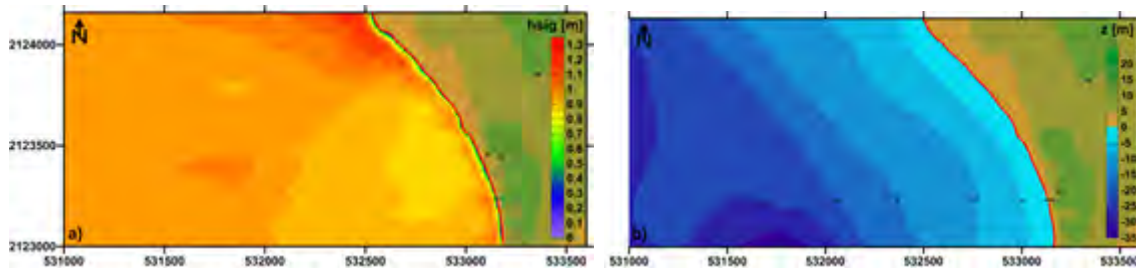


Figura 8. Modelo Delft3D: a)  $H_{sig}$ ; b) Batimetría y topografía para  $t = 1$  mes.

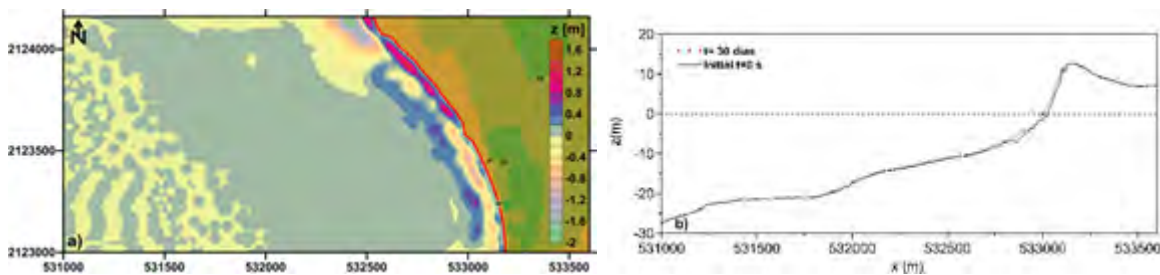


Figura 9. Modelo Delft3D: a) condiciones de erosión y acreción para  $t = 1$  mes, b) Perfil transversal en la coordenada  $Y = 2123030$ , inicial ( $t = 0$  hr) y final ( $t = 1$  mes).

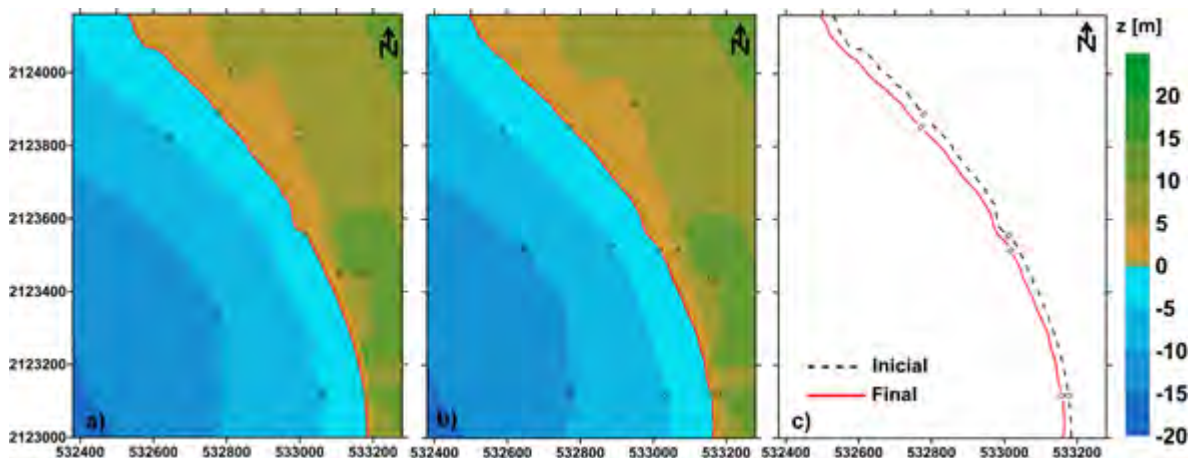


Figura 10. Modelo Delft3D. a) línea de costa inicial; b) línea de costa para  $t=1$  mes; c) variación entre líneas de costa.

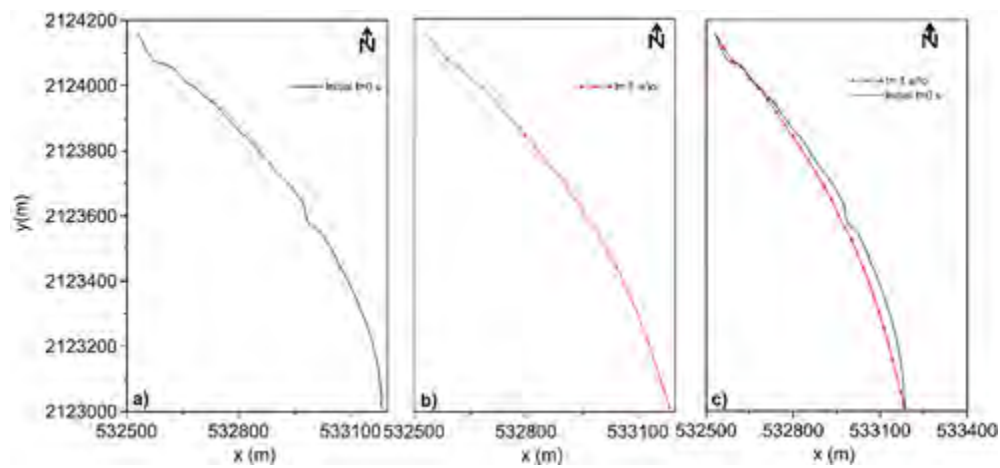


Figura 11. Modelo GENESIS: Evolución de la línea de costa a) condición inicial; b) después de un año de oleaje; c) similitud entre líneas de costa.

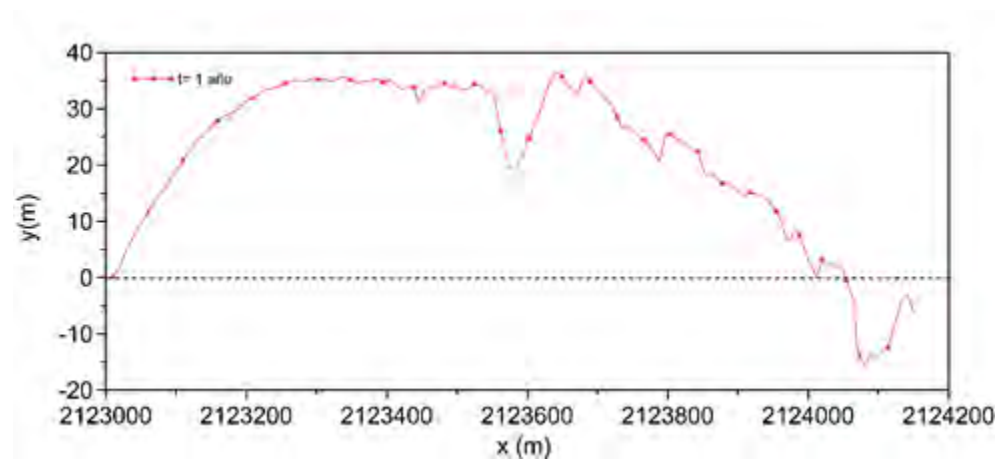


Figura 12. Modelo GENESIS. Condiciones de cambio en acreción y erosión en la línea de costa después de 1 año de simulación.

debido a que no existe una discrepancia entre los datos y los resultados. Los valores dependen totalmente del perfil de equilibrio (perfil de Dean), de la profundidad de cierre, condiciones de oleaje y de las propiedades del sedimento. La línea de costa durante el periodo de simulación produce información del retroceso y avance de la playa, que pueden considerarse muy elevados ya que hay una variación de más 30 metros en un año. (Figura 11).

En términos del retroceso y del avance de la playa, con respecto a la condición inicial (Figura 12), la evolución de la línea de costa, indica acreción en el centro del dominio. Estos valores pueden ser calibrados si se cuenta con datos de campo, se requieren al menos dos líneas de costa para diferentes periodos de tiempo. Además de la correcta caracterización del oleaje y su dirección de incidencia.

Los valores de la línea de costa en los extremos del dominio presentaron poca evolución, no proporcional a la evolución en el centro del sistema, lo que indica que la zona de estudio deberá estar lejos de las fronteras para evitar la influencia de la frontera. El modelo presenta una evolución del sistema aceptable para condiciones ordinarias, y de acuerdo con los criterios de desarrollo del modelo, no pude ser analizado para corto plazo. Es importante destacar que las condiciones de refracción y difracción, producto de la variación del fondo, no están consideradas en el sistema, y si la playa es gobernada por estas propiedades los resultados podrán tener mayor discrepancia. Así, el modelo tiende al equilibrio en el perfil de la playa y en la posición de la línea de costa, tal que en un tiempo determinado y bajo las mismas condiciones de oleaje el transporte

longitudinal neto, que domina el sistema, tienda a cero y por lo tanto al equilibrio de la playa.

## Conclusiones

Los modelos numéricos son una herramienta primordial para la predicción del comportamiento de las playas inducido por actividades antrópicas y procesos naturales. La utilización de estos modelos resulta fundamental para la evaluación de medidas correctivas y de mitigación. Algunos ejemplos de actividades antrópicas y procesos naturales son: la erosión de playas y dunas que ocurre bajo eventos extremos, configuración costera, el impacto de las estructuras costeras y mejoras en su diseño, ajuste de la playa con rellenos bajo condiciones de oleaje a largo plazo, acumulación de sedimentos y la construcción de tuberías.

Los modelos numéricos aplicados (XBeach, Delft3D y GENESIS) están basados en las teorías más representativas de los procesos costeros que buscan describir. Cada modelo ha sido validado e implementado en diferentes estudios. Los resultados de las tendencias de transporte de sedimento, de erosión y de deposición serán adecuados para representar la evolución del lugar, siempre que los modelos se empleen dentro de las características para las que fueron establecidos y utilizando datos representativos del lugar para una calibración adecuada.

En la actualidad no existe un modelo de evolución de playas que pueda ser implementado en cualquier escala de tiempo y que resuelva cualquier tipo de problema. Para representar las condiciones en el corto plazo, e incorporarlas a largo plazo, es necesario considerar los cambios del perfil de la playa. Además, los modelos que tiendan al

equilibrio de la costa deberían de involucrar aspectos como la interacción playa-bermudana tal que sea posible incluir la mayor parte de efectos climáticos, actuando sobre condiciones locales en el dominio de estudio.

Los modelos de evolución en el corto plazo se utilizan para predecir la evolución de perfil de playa en escalas temporales pequeñas, estos modelos simulan la evolución de un perfil de playa para cada instante de tiempo. El análisis es realizado para transporte transversal de sedimentos despreciando los efectos del transporte longitudinal. Los modelos de corto plazo buscan representar la evolución de los perfiles de las playas, incorporando el transporte transversal como factor predominante para el cambio del perfil. Este tipo de transporte es en la mayor parte de las condiciones originado por eventos extremos, por lo que su tiempo de acción sobre las playas es reducido. Sin embargo, en menos magnitud, pero también de importancia es el efecto de transporte presentado de forma estacional, el cual no es posible reproducir en los modelos de corto plazo debido a que estos modelos, no pueden ser empleados en intervalos de tiempo de meses o años, ya que se vuelven inestables y provocan resultados fuera de la realidad.

En los modelos de mediano plazo las condiciones del perfil transversal de la playa ya no pueden considerarse una condición esperada sino una tendencia del comportamiento del sistema, ya que el modelo considera transporte longitudinal y transversal. Así, los modelos de mediano plazo representan las variaciones estacionales del sistema bajo un estado de mar característico, generando una tendencia que puede considerarse estable en estos periodos y como un equilibrio dinámico del

sistema.

El modelo GENESIS aún con las limitaciones en la propagación de oleaje, al no considerar el efecto del fondo sobre el oleaje, puede generar resultados adecuados. Los resultados permiten aproximar la evolución de la línea de costa a largo plazo y en condiciones regulares, aun considerando que el modelo se rige por el transporte longitudinal y no considera transporte transversal.

Para que cada modelo genere buenos resultados y tendencias de transporte, es necesario considerar los siguientes puntos:

- Los tiempos de simulación deberán ser acordes con el modelo que se emplea.
- Los valores de entrada son representativos de las características del lugar y de los procesos físicos que rigen el sistema.
- Los aportes de sedimentos y sus propiedades más importantes deberán considerarse.
- El dominio de estudio deberá ser de un tamaño adecuado y las fronteras del sistema deben estar lejos de los puntos de mayor interés de análisis (esto para que las fronteras no afecten los resultados).
- La calidad de los datos de campo deberá ser tal que represente el estado del sistema y cuente con los registros necesarios para la calibración.

Para la correcta aplicación de los modelos numéricos es necesario considerar la calibración, por lo tanto, es indispensable contar con datos de campo en al menos dos periodos de tiempo diferentes, con lo cual se podría reproducir el comportamiento del

sistema en este intervalo, y así el modelo numérico genere las líneas de tendencias similares a los datos de campo.

## Referencias

Ávila, A. (2007) Procesos de múltiple escala en la evolución de la línea de costa. Universidad de Granada, Tesis Doctoral, 180 pp.

Baart, F., Den Bieman, J. P., Van Koningsveld, M., Parteli, E., Plant, N., and Roelvink, J. (2012). An integrated coastal model for aeolian and hydrodynamic sediment transport.

Dean, R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Ocean Engineering Report No. 12, Newark, Delaware: University of Delaware, Department of Civil Engineering.

Hanson, H. y Kraus, N.C., 1989. GENESIS-Generalized model for simulating shoreline change. Vol. 1: Reference Manual and Users Guide. Tech. Rep. CERC-89-19, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, 247pp.

Kriebel, D.K. y Dean, R.G. (1985). Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion, Coastal Engineering, Elsevier, Vol. 9, pp. 221-245.

Larson, M.; Kraus, N.C. y Hanson, H. (1990). Decoupled numerical model of three-dimensional beach range. Proc. 22nd Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2173-2185.

Lesser, G.R. (2009). An approach to medium-term coastal morphological modeling. PhD dissertation, Unesco-IHE

Institute for Water Education and Delft University of Technology, The Netherlands.

Pelnard-Consideré, R. (1956). Essai de Théorie de l'Évolution des Formes de Rivages en Plage de Sable et de Galets, 4ème Journées de l'Hydraulique, les Énergies de la Mer, Question III, Reporte n° 1, pp. 289-298.

Roelvink, J., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J. S. M., McCall, R., y Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering, 56(11-12):1133-1152.

Trouw, K. J. M., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., y Roelvink, D. (2012). Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: a sensitivity study with different types of numerical models. Coastal Engineering Proceedings, 1 (33), 23.