

Caracterización de procesos hidrodinámicos y morfológicos en playas heterogéneas

Rafael Jesús Bergillos Meca*
Tutor: Dr. Miguel Ortega Sánchez**

Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA), Universidad de Granada. Edificio CEAMA, Av. del Mediterráneo, s/n, E-18006, Granada, España.

Máster Oficial Interuniversitario en Hidráulica Ambiental. Especialidad: Gestión Integral de Puertos y Costas. Curso: 2012-2013.

Resumen

Las playas heterogéneas se caracterizan por presentar un amplio rango de tamaños de sedimento cuya distribución es variable tanto en profundidad como transversal y longitudinalmente. Si bien la morfodinámica de las playas de arena está bien estudiada, no sucede lo mismo con las playas heterogéneas. Este Trabajo Fin de Máster ha revisado los procesos de interacción hidrodinámica-playa heterogénea: reflexión, disipación, rotura de la ola, infiltración y percolación, ascenso y descenso de la lámina de agua por el talud, y respuesta morfodinámica. Se ha aplicado un modelo hidrodinámico a cuatro perfiles tipo, tres de ellos asemejables a los habituales del litoral andaluz del mar de Alborán, con unas hipótesis de partida y unas condiciones de forzamiento, iniciales y de contorno determinadas. Los resultados han manifestado la influencia del tamaño y distribución del sedimento en la evolución del oleaje, mostrando que la infiltración se relaciona directamente con la disipación de energía e inversamente con la reflexión, el refluo y la profundidad de rotura. Se ha cuantificado la tasa potencial de transporte longitudinal de sedimentos, evidenciando ésta una relación directa con el porcentaje de finos y el contenido energético del oleaje. Ha sido determinada la importancia relativa de la erosión frente a la acreción en cada uno de los casos de estudio. Contrastando los resultados con trabajos experimentales, se ha concluido que otros factores pueden ser importantes para describir el comportamiento de estas playas, lo cual ha permitido sugerir futuras líneas de investigación. Este trabajo supone el punto de partida en la elaboración de un modelo integral de gestión orientado a la regeneración, restauración y protección costera basado en la evolución del perfil de playa, considerando los diferentes agentes que fuerzan el sistema así como los procesos de interacción hidrodinámica-playa asociados a las distintas escalas de respuesta. El desarrollo de dicho modelo será el objetivo general en torno al cual se enmarcará la realización de una tesis doctoral.

Palabras clave: Playa heterogénea, granulometría, pendiente del perfil, reflexión, rotura de la ola, infiltración, modelo hidrodinámico, ensayo de laboratorio, campaña de campo.

1. Introducción

El desarrollo sostenible de la costa constituye uno de los mayores retos a los que se enfrentan los gestores. Dicha gestión se debe basar, entre otros factores, en el conocimiento preciso y en la simulación de la respuesta de la costa a los diferentes agentes forzadores que actúan sobre ella (Losada et al., 2009).

Dentro de las distintas tipologías costeras, las playas heterogéneas son sistemas compuestos por un am-

plio rango de tamaños de sedimento cuya estratificación vertical es variable y con proporciones y gradación cambiantes tanto transversal como longitudinalmente (Holland and Elmore, 2008). Estas variaciones pueden ser reforzadas por la presencia de formas rítmicas, como las formas cuspidales (Short, 1999; Ortega-Sánchez et al., 2008), adquiriendo gran interés para diseñar medidas de gestión y protección costera (Li et al., 2006). Además, estas playas se caracterizan por presentar elevadas pendientes y reflejar una proporción significativa de la energía incidente. Suelen tener una línea de rotura bien definida así como distintos escalones y bermas distribuidos en el perfil que se modifican en función de

*rafabm@correo.ugr.es

**miguelos@ugr.es

las condiciones de forzamiento y los procesos erosivos-deposicionales que se produzcan. Son playas que, en general, se erosionan poco y cuya recuperación tras el paso de tormentas es rápida. No obstante, su morfodinámica no ha sido descrita de forma precisa, pues los modelos existentes no son capaces de reproducirla de forma fiable (Williams et al., 2012).

Durante los últimos años, distintos trabajos han destacado la discrepancia existente entre los avances llevados a cabo tanto en la hidrodinámica como en la morfodinámica de playas homogéneas y la ausencia de progresos similares en playas heterogéneas y de gravas (Van Wellen et al., 2000; Mason and Coates, 2001; Jennings and Shulmeister, 2002; Horn and Walton, 2007; Pontee et al., 2004). El uso común de sedimentos gruesos como elementos de defensa en playas erosionadas (Van Wellen et al., 2000) ha hecho que las investigaciones relacionadas con estas tipologías sean cada vez mayores (Turner and Masselink, 2012; Williams et al., 2012; Thompson et al., 2012; Matias et al., 2012). Lo anterior, unido al previsible aumento del nivel del mar en los próximos años y, para el caso de España, a la reciente aprobación de la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, hace que resulte fundamental establecer un control preciso de los procesos físicos de interacción hidrodinámica-playa heterogénea. Su caracterización, cuantificación y modelado son aspectos clave de este trabajo.

1.1. Clasificaciones de playas

Las playas se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios. Este apartado recoge las principales clasificaciones relacionadas con la hidrodinámica y las características del sedimento, por su relación con la temática del trabajo. En base a la granulometría del material, se distinguen: playas homogéneas o de arena, con tamaño de grano menor de 2 mm; playas de grava, con sedimentos de tamaño mayor de 2 mm; y playas heterogéneas, en las que se centra este estudio, estando compuestas por distintos tamaños de arena y grava.

Davies and Clayton (1980) dividieron las costas del mundo en tres grupos: de latitudes altas (50-90°), con oleajes de bajo contenido energético y cuyos sedimentos son gruesos, oscuros y compuestos por minerales inestables; de latitudes medias (30-50°), con oleajes de contenido energético moderado a alto, predominando en ellas arenas de cuarzo de tamaño fino a medio y llanuras carbonatadas; y de latitudes bajas (0-30°), con oleajes de bajo a moderado contenido energético y constituidas por arenas finas de cuarzo, arenas carbonatadas y arrecifes

de coral. Wright and Short (1984), por su parte, distinguieron playas completamente disipativas y altamente reflexivas, reconociendo entre ambas cuatro estados intermedios con coexistencia de procesos de disipación y reflexión.

Carter and Orford (1993) propusieron, en función de las características morfológicas, dos clases de playas heterogéneas: las de pendiente simple, aproximadamente constante desde la cresta de la playa hasta el nivel de la bajamar máxima viva equinocial; y las de pendiente compuesta, presentando la zona alta del perfil mayor inclinación que la zona situada inmediatamente inferior a ella. Jennings and Shulmeister (2002), sin considerar las compuestas de arena, clasificaron las playas en tres grupos: de grava, mixtas de arena y grava, y compuestas, siendo las dos últimas playas heterogéneas. Su carácter frecuente y la exigüidad de estudios referentes a las mismas justifican la finalidad de este trabajo.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este Trabajo Fin de Máster es avanzar en el conocimiento de los procesos hidrodinámicos y morfológicos que tienen lugar en playas heterogéneas. Para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Estudio de los procesos de interacción hidrodinámica-playa heterogénea: reflexión, disipación, rotura de la ola, infiltración y percolación, ascenso y descenso de la lámina de agua por el talud, y respuesta morfodinámica.
2. Aplicación de un modelo hidrodinámico a perfiles de playa que se asemejen a los característicos del litoral andaluz del mar de Alborán.
3. Análisis de trabajos experimentales (campañas de campo y ensayos de laboratorio) relativos a playas heterogéneas.

2. Área de Estudio

Este Trabajo Fin de Máster se centra en dos playas heterogéneas del litoral granadino, al sur de la Península Ibérica: Carchuna y Playa Granada.

Carchuna es una playa reflejante con una longitud aproximada de 4 km y alineación media Oeste-Este, limitada al Oeste por el cabo Sacratif y al Este por la punta de Carchuna (Figura 1). La composición del sedimento varía desde arenas finas hasta gravas, con diámetros que oscilan entre 0.1 mm y 50 cm. Presenta formas cuspidales a lo largo de la línea de costa en cuyos picos se concentra el sedimento más grueso (Ortega-Sánchez et al., 2003).



Figura 1: Playa de Carchuna. (a) Formas cuspidales y gradación longitudinal de tamaños de sedimento. (b) Gradación transversal.

Playa Granada tiene una extensión próxima a los 5 km, estando limitada al Oeste por la desembocadura del río Guadalfeo y al Este por el puerto de Motril. Aspectos característicos de esta playa son la marcada variación transversal del tamaño del grano, la formación de barras y terrazas mareales así como la presencia de bermas de tormenta debido al transporte de finos en dirección *off-shore* (Figura 2).



Figura 2: Playa Granada. Berma de tormenta y variabilidad de tamaños de grano.

3. Metodología

En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte basada en un estudio teórico de los procesos que gobiernan la morfodinámica del perfil de playa y su importancia en el transporte de sedimentos, prestando especial atención a las diferencias entre playas de arena, de grava y heterogéneas.

Posteriormente, se aplica un modelo numérico 2DV *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), el IH-2VOF, con objeto de cuantificar los procesos físicos de interacción. Para definir los perfiles tipo, representativos de las zonas de estudio, se cuenta tanto con datos morfológicos como con fotografías realizadas en el desarrollo de este trabajo. El oleaje de cálculo se determina a partir de series de datos meteorológicos y oceanográficos de las que dispone el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada.

De forma paralela, se estudian los trabajos experimentales, tanto de campo como de laboratorio, referentes a la interacción hidrodinámica-playa heterogénea.

Finalmente, se contrastan las soluciones del modelo con las conclusiones derivadas de ensayos y campañas, discutiendo la validez de los resultados obtenidos y trazando las directrices futuras a seguir en el seno de esta línea de investigación.

4. Procesos físicos de interacción hidrodinámica-playa heterogénea

Los procesos de interacción hidrodinámica-playa están influenciados tanto por el nivel del mar y el oleaje incidente, como por la forma del perfil y su distribución granulométrica. El modo en que se reproducen dichos procesos en playas heterogéneas así como la respuesta de éstas, tanto en planta como en perfil, son distintos a los de playas homogéneas y de grava (Pontee et al., 2004). Sin embargo, actualmente no existen investigaciones que posibiliten desarrollar metodologías ciertas para pronosticar su comportamiento (Karunaratna et al., 2012). En términos de gestión costera, por tanto, se tiene la necesidad de conocer de forma precisa estos procesos.

4.1. Reflexión

La reflexión es el proceso por el cual una parte de la energía del tren de ondas incidente, al interactuar con la playa, es devuelta al mar. Se puede cuantificar a partir del coeficiente de reflexión, definido como:

$$R = |R| e^{i\varphi} = \frac{A'_R}{A'_I} = \frac{A_R}{A_I} e^{i(\varphi_R - \varphi_I)} \quad (1)$$

Donde $|R|$ representa su módulo, $\varphi = \varphi_R - \varphi_I$ el desfase existente entre la onda incidente y la reflejada, mientras que A'_I , A_I , A'_R y A_R son las amplitudes complejas y reales de las ondas incidente y reflejada, respectivamente. Otra forma de definir dicho coeficiente es (López de San Román-Blanco, 2004):

$$K_R = \sqrt{\frac{S_R}{S_I}} \quad (2)$$

Siendo S_I es la energía incidente y S_R la energía reflejada.

Battjes (1974), Chesnutt (1978) y Miche (1951) propusieron distintas formulaciones para determinar el coeficiente de reflexión, siendo todas ellas dependientes de la pendiente del perfil de playa. En la figura 3 se observa que existe una relación directa entre pendiente de la playa y coeficiente de reflexión, por lo que cabría esperar que la reflexión de una playa heterogénea sea menor que la de una playa de grava y mayor que la de una playa de arena. Sin embargo, Mason et al. (1997) concluyeron que un perfil de playa heterogénea refleja mayor energía que una playa de arena, debido a su mayor pendiente; y que una playa de grava, debido a una menor disipación de energía por infiltración.

La reflexión será significativa cuando el número de Iribarren (Ecuación 3) sea mayor de 1 (Iribarren and Nogales, 1964); mientras que podrá despreciarse siempre que el parámetro de pendiente (Ecuación 4) sea menor de 0.1 (Baquerizo et al., 2005).

$$I_r = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (3)$$

$$S_R = \frac{\tan\beta}{kh} \quad (4)$$

Donde $\tan\beta$ es la pendiente del perfil de playa, H la altura de ola significativa y L_0 la longitud de onda en profundidades indefinidas. Considerando una altura de ola significativa de 1 m, la reflexión en los casos de periodo corto ($T = 5$ s), medio ($T = 8$ s) y largo ($T = 12$ s) será relevante para valores de $\tan\beta$ iguales o mayores a 0.16, 0.1 y 0.07, respectivamente (Figura 4).

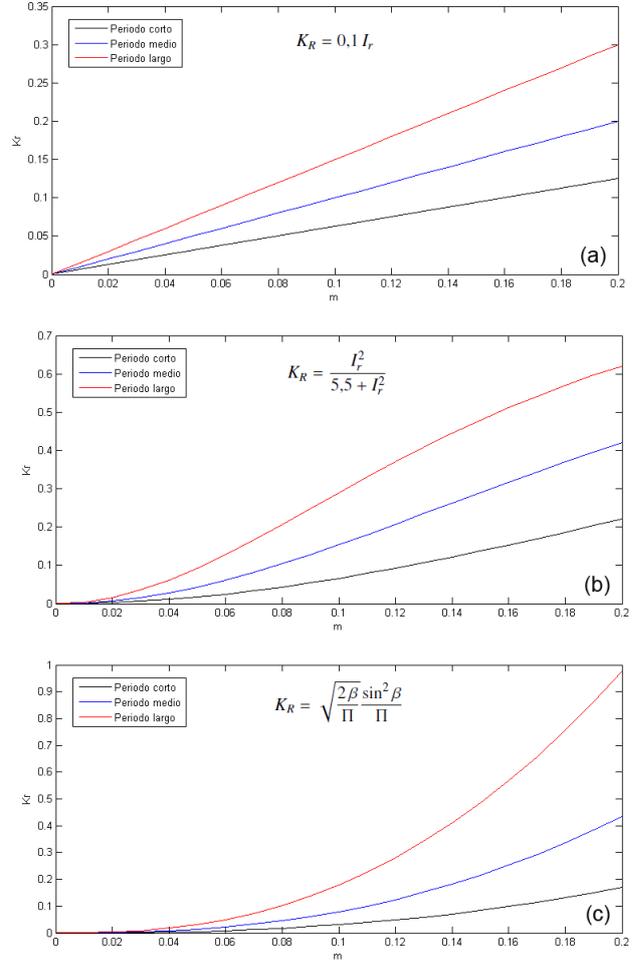


Figura 3: Valores del coeficiente de reflexión en función de la pendiente del perfil de playa. (a) Criterio de Battjes (1974). (b) Criterio de Chesnutt (1978). (c) Criterio de Miche (1951).

4.2. Disipación

La disipación cuantifica la pérdida de energía oscilatoria debida fundamentalmente a los mecanismos de rotura y fricción por el fondo. Es un proceso complementario a la reflexión, pudiendo definirse el coeficiente de disipación como (López de San Román-Blanco and Holmes, 2002):

$$K_D = \sqrt{1 - K_R^2} = \sqrt{1 - \frac{S_R}{S_I}} \quad (5)$$

En la figura 5 se observa que existe una relación inversa entre pendiente de la playa y coeficiente de disipación, por lo que cabría esperar que la disipación de una playa heterogénea sea mayor que la de una playa de grava y menor que la de una playa de arena. No obstante, este proceso también depende de la porosidad del lecho

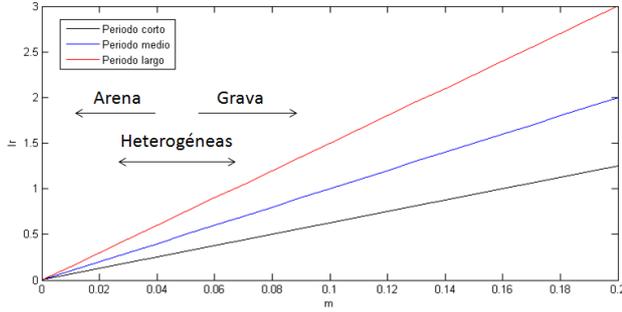


Figura 4: Valores del número de Iribarren en función de la pendiente del perfil de playa. Rangos aproximados de pendientes típicas en playas de arena, de grava y heterogéneas.

(Lara et al., 2012), de modo que cuanto mayor sea ésta mayor será la disipación de energía del oleaje incidente, pudiendo llegar a inhibir el proceso de rotura (Higuera et al., 2012). En todo caso, la disipación debida a la rotura resulta ser dominante.

Las playas heterogéneas se comportan como estructuras porosas e hidráulicamente rugosas. El tamaño y la distribución espacial del sedimento influyen en la disipación, de modo que a mayor tamaño de grano mayor será la disipación de energía (Buscombe and Masselink, 2006).

4.3. Rotura de la ola

La rotura de la ola representa el colapso de la onda, siendo un fenómeno de disipación de energía que se produce cuando las olas se aproximan a zonas de escasa profundidad. Se trata de un proceso caracterizado por la disipación de energía debida a la turbulencia (Higuera et al., 2012). La ola pasa de tener un perfil superficial continuo a otro con discontinuidades. Las características de la ola al romper dependen de la pendiente del talud, el peralte y la profundidad relativa. En función de los valores que adopte el número de Iribarren (Ecuación 3) se distinguen los siguientes tipos de rotura (Iribarren and Nogales, 1964): decrestamiento ($I_r < 0,5$), voluta ($0,5 < I_r < 2,5$), colapso ($2,5 < I_r < 3,5$) y oscilación ($I_r > 3,5$).

El criterio que mejor describe el proceso de rotura en playas heterogéneas es el régimen rotura-reflexión (Losada, 2009), según el cual la rotura se produce con la contribución de la reflexión y la fase determina el punto de rotura. Se define el peralte máximo de la ola como:

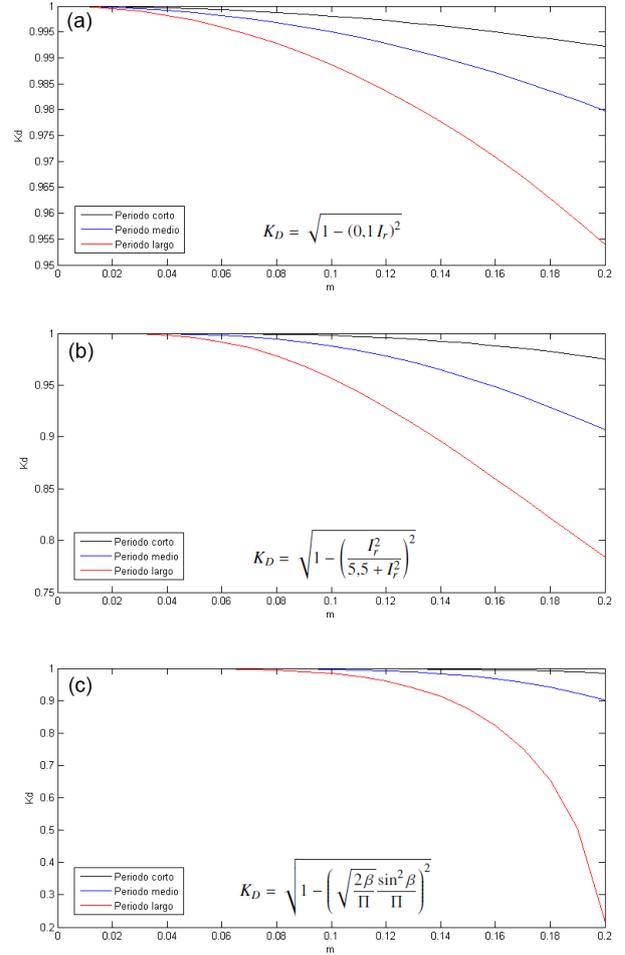


Figura 5: Valores del coeficiente de disipación en función de la pendiente del perfil de playa. (a) Criterio de Battjes (1974). (b) Criterio de Chesnutt (1978). (c) Criterio de Miche (1951).

$$\left(\frac{H}{L_0}\right)_b \approx 0,0277 \tanh\left(\frac{\beta_{lim}}{2\pi} \left(\frac{h}{g T^2}\right)^{\gamma_{lim}}\right) \quad (6)$$

$$\beta_{lim} = 17,7 \quad \left(m < \frac{1}{15}\right) \quad (7)$$

$$\gamma_{lim} = 0,9 \quad \left(m < \frac{1}{10}\right) \quad (8)$$

$$\left(\frac{H}{L_0}\right)_b \approx 0,0277 \tanh\left(\frac{\beta_{lim}}{2\pi} \left(\frac{h}{L_0}\right)^{\gamma_{lim}}\right) \quad (9)$$

$$\beta_{lim} = 1,52 m + 6,6 \quad \left(m \geq \frac{1}{15}\right) \quad (10)$$

$$\gamma_{lim} = 1,92 m + 0,72 \quad \left(m \geq \frac{1}{10}\right) \quad (11)$$

Donde h es el calado, g la aceleración de la gravedad, y m la pendiente del perfil de playa.

La rotura en playas porosas es compleja, induciendo una transformación morfológica en función de la pendiente de las mismas. Puesto que en playas heterogéneas la pendiente es mayor que la de playas homogéneas, las olas se aproximan más a la costa antes de la rotura (Austin and Masselink, 2006; Van Wellen et al., 2000), generando una estrecha zona de rompientes en la que la energía del oleaje se concentra en líneas paralelas a la costa (Buscombe and Masselink, 2006) e induciendo una rotura más violenta que en playas homogéneas. Bajo esas condiciones, la zona *swash* y la zona de rompientes presentan extensiones similares. Así, mientras que la zona intermareal es la región de mayor actividad morfodinámica en playas de arena, las playas heterogéneas muestran mayor dinamismo en la zona *swash* (Karunaratna et al., 2012). Por tanto, resulta clave describir el proceso de rotura para caracterizar la morfodinámica de estas tipologías costeras (Pedrozo-Acuña et al., 2010). Durante episodios de tormenta predomina la rotura en voluta, siendo los impactos de la ola un factor importante en la movilización del sedimento (Pedrozo-Acuña et al., 2008).

4.4. Infiltración y percolación

La infiltración es la penetración de agua a través de los poros del lecho, mientras que la percolación hace referencia al movimiento del fluido en el seno del medio poroso. Ambos procesos se relacionan directamente con la porosidad y la permeabilidad, siendo función del tamaño, forma, mezcla, orientación y gradación del sedimento (Buscombe and Masselink, 2006). De acuerdo con McDougal (1993), el coeficiente de permeabilidad se relaciona con el diámetro nominal (D_{50}) y la porosidad (n) a partir de la ecuación 12. Considerando tres valores del diámetro característico (Figura 9): uno representativo de playas homogéneas ($D_{50} = 0,35$ mm), otro de playas de grava ($D_{50} = 6$ mm) y la media ponderada de la distribución del sedimento en una playa heterogénea ($D_{50} = 2,1$ mm), se obtienen los resultados mostrados en la tabla 1. Se comprueba que la permeabilidad en el caso heterogéneo es menor que la de una playa de grava y mayor que la de una playa de arena.

$$K_p(\text{m}^2) = 1,643 \cdot 10^7 \left(\frac{D_{50}(\text{mm})}{10} \right)^{1,57} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (12)$$

Cuanto mayor es la permeabilidad de una playa menor será la altura de ola y mayor la asimetría del frente de olas incidente (Pedrozo-Acuña et al., 2010) puesto

D_{50} (mm)	n (-)	K_p (m ²)
0,35	0,4	94533
2,1	0,4	1575000
6	0,4	8186400

Tabla 1: Valores del coeficiente de permeabilidad en función del tamaño característico del sedimento.

que aumentará la infiltración del flujo ascendente en la zona *swash*, debilitando la acción del flujo descendente. La infiltración influye, además, en el transporte de sedimentos, la formación de bermas y la estabilidad del perfil de playa, tanto más cuanto mayor sea el tamaño del grano (Turner and Masselink, 1998). Los efectos hidráulicos son más importantes en la dinámica de playas de grava que en la de playas homogéneas (Buscombe and Masselink, 2006) debido a que la influencia de la infiltración en el transporte de sedimento es menor en lechos de arena (Karunaratna et al., 2012), mostrando las playas heterogéneas un comportamiento intermedio entre ambas.

4.5. Ascenso y descenso de la lámina de agua por el talud

El valor máximo del ascenso de la lámina de agua sobre el nivel medio depende del tipo de rotura y de las características del talud, principalmente: pendiente, rugosidad y permeabilidad. Los estudios sobre *run-up* (Nielsen and Hanslow, 1991; Nielsen and Kang, 1996; López de San Román-Blanco, 2004) muestran que cuanto mayor es la pendiente mayor es el ascenso de la lámina de agua sobre el nivel medio por lo que, considerando únicamente este parámetros, el *run-up* en una playa heterogénea sería mayor que el de una playa de arena y menor que el de una playa de grava (Figura 6). Sin embargo, el flujo sobre el talud está relacionado también con la forma y posición de los sedimentos más gruesos, de modo que el descenso de la lámina de agua será tanto mayor cuanto menor sea el tamaño del sedimento. Por ello, los modelos numéricos suelen asumir lechos impermeables en playas de arena (Lara et al., 2006; Torres-Freyermuth et al., 2007). En playas heterogéneas y de grava se produce asimetría en las velocidades de ascenso y descenso del flujo por efecto de la infiltración.

4.6. Respuesta morfodinámica

La respuesta morfodinámica hace referencia tanto al transporte de sedimento como a la generación de formas costeras y variación del perfil de playa por acción de agentes forzadores hidrodinámicos, existiendo un desfase temporal entre procesos hidrodinámicos y ajustes morfológicos (Buscombe and Masselink, 2006). En la

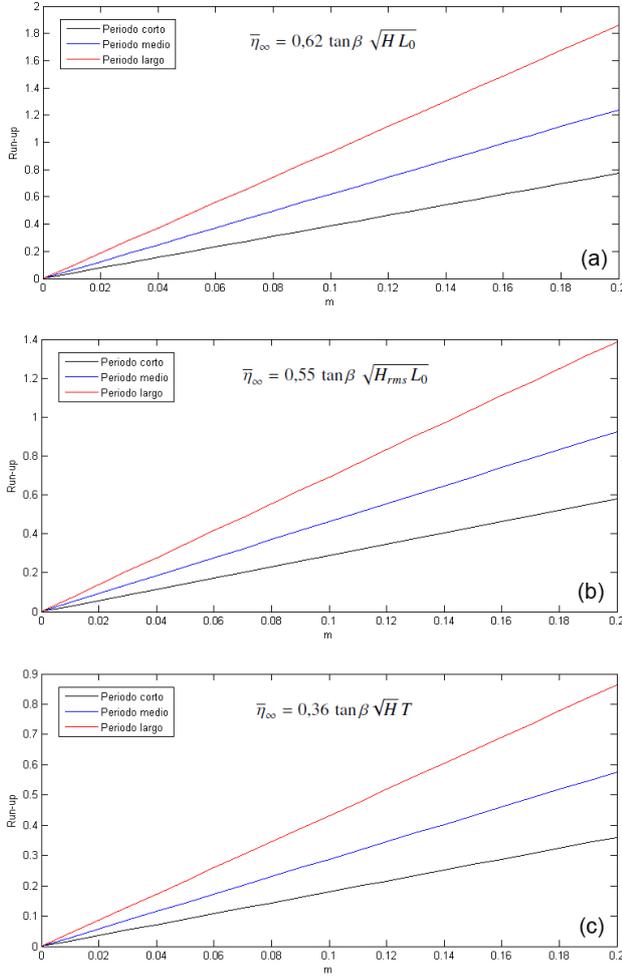


Figura 6: Valores del run-up en función de la pendiente del perfil de playa para una altura de ola significativa de 1 m. (a) Criterio de López de San Roman-Blanco (2004). (b) Criterio Nielsen y Kang (1996). (c) Criterio de Nielsen y Hanslow (1991).

mayor parte de los estudios se ha considerado de forma simplificada que el lecho es homogéneo y uniforme (Wright and Short, 1984). Sin embargo, numerosos trabajos han mostrado que las diferencias respecto a las situaciones heterogéneas pueden ser muy relevantes (Horn and Walton, 2007), al producirse la mayor parte del transporte de sedimentos en la zona de ascenso y descenso del agua por el talud (Kirk, 1980).

Los cambios transversales se asocian a la variación espaciotemporal del perfil de playa, estando controlados por el oleaje, las mareas y las características del sedimento, como el tamaño del grano (Horn, 2002). Las arenas son transportadas en ambas direcciones por efecto del oleaje (Carter and Orford, 1984), mientras que las

gravas son propensas al movimiento en dirección *onshore* debido a su alto umbral de movimiento así como a la asimetría en el ascenso y descenso del flujo. La relación erosión-acreción propuesta por Sunamura and Horikawa (1974) establece que la erosión de la playa tiene lugar cuando el peralte de la ola en profundidades indefinidas es mayor que la pendiente del fondo, produciéndose acreción en caso contrario (Ecuación 13). El valor medio del tamaño de grano no es un valor tan importante como el ratio y distribución de sedimentos finos y gruesos para modelar el transporte (Thaxton et al., 2001), produciéndose discrepancia con los datos experimentales cuando sólo es considerado un diámetro característico (Camenen and Larroudé, 2003). Por ello, se ha aplicado la ecuación 13 considerando tres valores distintos para el D_{50} , en función de la distribución del tamaño del sedimento en una de las zonas de estudio (Figura 9): uno representativo de la fracción fina ($D_{50} = 0,35$ mm), el valor medio ponderado de la distribución ($D_{50} = 2,1$ mm) y otro representativo de la fracción gruesa ($D_{50} = 6$ mm). Se comprueba que cuanto mayor sea la pendiente y menores el tamaño de grano y el periodo, mayor será la posibilidad de que se produzca erosión en el perfil de playa (Tabla 2 y Figura 7).

$$\frac{H}{L_0} = C (\tan \beta)^{-0,27} \left(\frac{D}{L_0} \right)^{0,67} \quad (13)$$

Donde $C = 18$ es un coeficiente empírico.

Periodo (s)	H/L_0 (-)
5	0.256
8	0.01
12	0.0044

Tabla 2: Valores de la parte izquierda de la ecuación 13 en función del periodo.

La forma en planta viene determinada por la variación en la posición y orientación de la línea de costa. Se caracteriza por el desarrollo de formas rítmicas, como las formas cuspidales (Short, 1999; Ortega-Sánchez et al., 2008), generalmente asociadas a entornos que sufren procesos erosivos con un importante aporte terrestre de material. El transporte potencial de sedimentos a lo largo de la línea de costa puede ser cuantificado a partir de la expresión (Milano, 2008):

$$Q = a_1 (H^2 C_g)_b \sin(2\alpha_b) \quad (14)$$

Donde C_g la celeridad de grupo, α el ángulo de incidencia del oleaje y a_1 un coeficiente adimensional que se obtiene como:

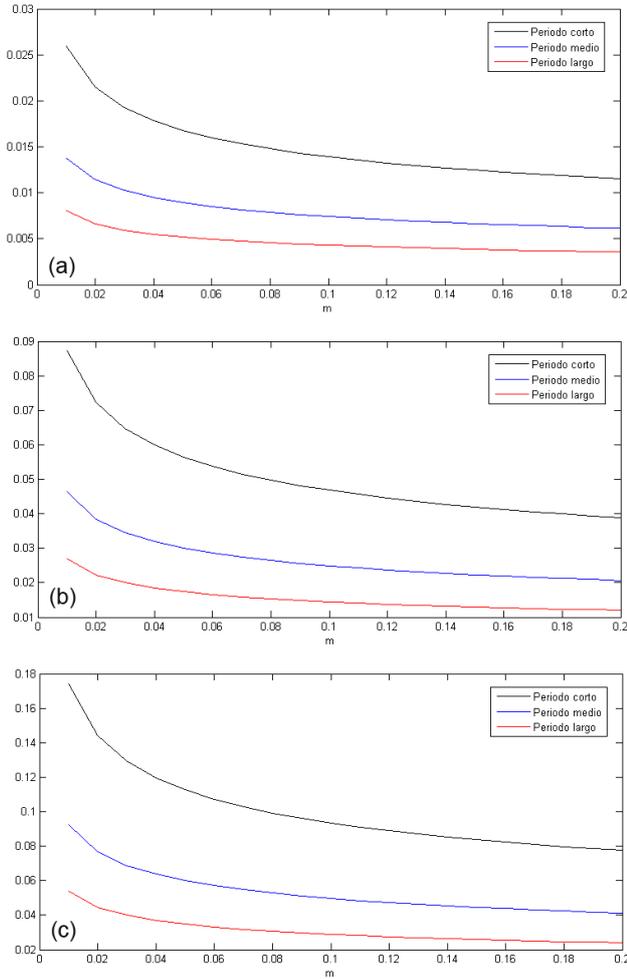


Figura 7: Valores de la parte derecha de la ecuación 13 en función de la pendiente del perfil de playa. (a) Diámetro característico representativo fino. (b) Media ponderada de tamaños del sedimento. (c) Diámetro característico representativo grueso.

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1 - n) 1,416^{2,5}} \quad (15)$$

Siendo n la porosidad, ρ_s la densidad del sedimento, ρ la densidad del agua y K_1 un coeficiente adimensional relacionado con el tamaño medio del grano a partir de la ecuación:

$$K_1 = K_0 \log \left(\frac{1,46}{D_{50}} \right) \quad (16)$$

Donde $K_0 = 0,28$ es un coeficiente propuesto por Komar and Inman (1970). Esta formulación ha sido aplicada a playas heterogéneas del litoral italiano (Noli and Marini, 1992).

Las playas heterogéneas responden a las acciones marinas mediante la formación de barras, terrazas marales, escalones y bermas, así como modificando la gradación transversal y longitudinal del sedimento en función de las condiciones de forzamiento y los procesos erosivos-depositivos que se produzcan (Schwartz and Birkemeier, 2004). El proceso de armado, típico de estas playas (Mason and Coates, 2001), se origina debido al transporte en dirección *offshore* de arena durante episodios de tormenta, permaneciendo la fracción de grava e incrementándose la estabilidad de la playa. En condiciones de calma, la fracción arenosa es transportada en dirección *onshore*, recuperándose el estado inicial con mayor celeridad que en playas homogéneas (Bramato et al., 2012). Las formas predominantes de transporte varían en función de la permeabilidad, de modo que las arenas son movidas fundamentalmente por saltación y suspensión; mientras que las gravas son trasladadas por deslizamiento, rodadura y, en menor medida, saltación (Carter and Orford, 1984).

5. Modelos numéricos

Los procesos descritos en el apartado anterior actúan de forma conjunta, existiendo una influencia recíproca entre cambios del perfil de playa y acción del oleaje (Buscombe and Masselink, 2006). Al contrario que en el caso playas de arena o grava, en el estudio de la morfodinámica de playas heterogéneas no pueden ser despreciados ninguno de los procesos de interacción, por lo que se requiere del uso de modelos hidrodinámicos avanzados.

La mayor parte de los modelos existentes han sido inicialmente desarrollados para playas de arena, incluyendo con posterioridad un mayor rango de tamaños de grano. Los principales problemas con respecto a la extensión de estos modelos a playas heterogéneas son (Mason and Coates, 2001; López de San Román-Blanco and Holmes, 2002): (1) Describen de forma simplista los sedimentos de la playa, generalmente con un solo valor del D_{50} ; (2) Suponen una composición del perfil de playa inalterable en el tiempo, tanto longitudinal como transversalmente; (3) Consideran superficie impermeable, despreciando los flujos a través del lecho; (4) Asumen un único umbral de movimiento basado en el tamaño medio de grano.

En este apartado se describe, en primer lugar, un modelo numérico 2DV *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), aplicándolo a perfiles de playa asemejables a los habituales de las zonas de estudio. Se ha probado su validez tanto en estructuras marítimas de alta permeabilidad (Losada et al., 2008; Lara et al., 2008; Guanche

et al., 2009) como en perfiles de playa de arena (Torres-Freyermuth et al., 2007; Lara et al., 2011; Ruju et al., 2012), por lo que es esperable la obtención de resultados fiables en playas heterogéneas. Posteriormente, se presenta un modelo de propagación bidimensional que, al margen de la vertiente hidrodinámica, considera el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos de la costa: el XBEACH.

5.1. Modelo hidrodinámico: IH-2VOF

Descripción del modelo

El IH-2VOF (Lara et al., 2010), versión actualizada del COBRAS (Liu et al., 1999), permite resolver el flujo en medios porosos y en regiones de fluido a través de un promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes basado en la descomposición de variables de Reynolds (RANS). Se asume que el tensor de esfuerzos de Reynolds está relacionado con el ratio de deformación del flujo a través de un modelo algebraico no lineal $k - \epsilon$ (Shih et al., 1996; Lin and Liu, 1999). El flujo en medio poroso se calcula integrando las ecuaciones promediadas de Navier Stokes (RANS) en un volumen de control mucho mayor que el tamaño característico de los poros pero mucho menor que la longitud característica del flujo (Hsu et al., 2002). Aplicando esta descomposición a las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento se obtienen las expresiones mostradas en el apéndice A (VARANS).

La formulación referente a la rotura de la ola calcula la generación y transporte tanto de vorticidad como de energía cinética turbulenta (Veeramony and Svendsen, 2000). El IH-2VOF representa el proceso de rotura de la ola y describe el flujo sobre la playa. En playas de arena, puesto que la infiltración suele ser pequeña (Mas-selink and Li, 2001), se puede asumir lecho impermeable; mientras que en playas heterogéneas y de gravas no es válida tal consideración, debiendo establecer valores característicos para el diámetro nominal y la porosidad.

Aplicación del modelo

Se definen, en adición a las propias del modelo, las siguientes hipótesis de partida: (1) Oleaje regular, (2) Perfiles tipo de pendiente constante (Figura 8). El primero de ellos (*Basic state*) corresponde a una playa de arena de pendiente 1:30. La elección del *Basic state* responde a que se ha probado la validez del modelo para simular el comportamiento de una playa con estas características (Ruju et al., 2012). El segundo perfil se define situando sobre el anterior una capa de 5 cm de espesor con porosidad de 0.4 y diámetro nominal de 6 mm, por ser el más frecuente de entre los gruesos de la zona de

estudio (Figura 9). El tercer perfil es análogo al anterior pero con un espesor de la capa superior igual a 25 cm. El cuarto, por su parte, añade una capa de 5 cm de espesor con porosidad de 0.4 y diámetro nominal de 0.35 mm, por ser el más frecuente de entre los finos de la zona de estudio (Figura 9). Se consideran, como condiciones de forzamiento, altura significativa de 1 m y periodos de 5 (corto), 8 (medio) y 12 (largo) segundos (Tabla 3), realizándose mediciones en quince puntos distintos del perfil de playa (Tabla 5). Como condiciones iniciales se adoptan velocidades nulas y presión hidrostática, mientras que en la superficie libre se imponen presión y tensión tangencial nula. Finalmente, como condiciones laterales se considera contorno abierto en el borde izquierdo (absorción) y cerrado en el derecho (no absorción).

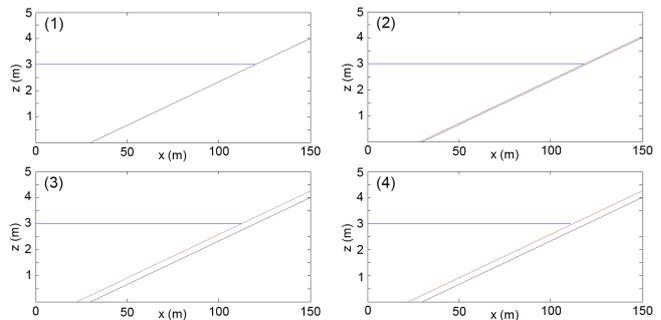


Figura 8: Perfiles de playa tipo.

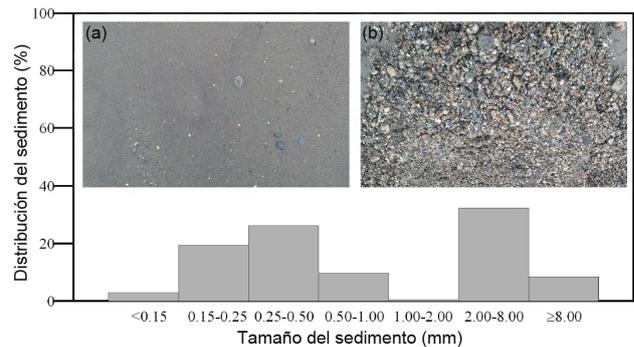


Figura 9: Histograma de la distribución de tamaños del sedimento en la playa de Carchuna. (a) Fracción arenosa o sedimento fino. (b) Fracción de grava o sedimento grueso.

El IH-2VOF tiene un gran potencial para ser aplicado en combinación con modelos que reproduzcan el transporte de sedimento (Torres-Freyermuth et al., 2007), como es el caso del modelo bidimensional XBEACH.

Caso	h (m)	T (s)	H (m)	L_0 (m)	Ir (-)
1A	3	5	1	39	0.2082
1B	3	8	1	100	0.3333
1C	3	12	1	225	0.5
2A	3	5	1	39	0.2082
2B	3	8	1	100	0.3333
2C	3	12	1	225	0.5
3A	3	5	1	39	0.2082
3B	3	8	1	100	0.3333
3C	3	12	1	225	0.5
4A	3	5	1	39	0.2082
4B	3	8	1	100	0.3333
4C	3	12	1	225	0.5

Tabla 3: Casos simulados en el modelo IH-2VOF.

Punto	x (m)
1	25
2	37.5
3	50
4	55
5	60
6	65
7	70
8	75
9	80
10	85
11	90
12	95
13	100
14	112.5
9	125

Tabla 4: Posición de los puntos de medida.

5.2. Modelo morfodinámico: XBEACH

El XBeach es un modelo numérico 2DH (promediado en profundidad) que acopla procesos hidrodinámicos y respuestas morfodinámicas. Caracteriza la propagación de ondas cortas, las ondas en aguas poco profundas, el transporte de sedimentos y la evolución morfológica del lecho. La propagación de ondas cortas se modela a través de la ecuación de acción de onda (Holthuijsen et al., 1989) mientras que el proceso de rotura en aguas poco profundas se simula a partir de un balance de energía del *roller* (Nairn et al., 1990; Stive and Dingemans, 1984). El flujo es descrito por las ecuaciones de aguas someras no lineales (NSWE). Emplea un enfoque lagrangiano medio generalizado (Walstra et al., 2000) para obtener las velocidades eulerianas del flujo. Cuantifica el *run-up* y el arrastre de finos por conservación de cantidad de movimiento (Stelling and Verwey, 2005).

La concentración de sedimentos de equilibrio se obtiene a partir de las acciones hidrodinámicas, actuando como un término fuente en la ecuación de advección-difusión (Galappatti, 1983). El arrastre por fondo y las tasas de transporte de sedimentos en suspensión se calculan mediante la formulación de Van Rijn (2007), expuesta en el apéndice B. Por su parte, los cambios en el nivel del lecho (z_b) se obtienen a partir de los gradientes

de la tasa de transporte de sedimentos, asumiendo que se producen en un intervalo de tiempo mucho mayor que el asociado con los procesos hidrodinámicos (Apéndice B).

El XBeach tiene en cuenta la retroalimentación entre los cambios batimétricos y la hidrodinámica en cada paso de tiempo (bucle morfodinámico). Se ha probado que los resultados del modelo se ajustan bastante bien a los datos experimentales tanto en playas de arena (Roelvink et al., 2009) como en playas de grava (Turner and Masselink, 2012; Williams et al., 2012). Queda por comprobar su validez a la hora de modelar el comportamiento de playas heterogéneas.

6. Trabajos experimentales

La comparación entre modelos numéricos y datos experimentales (ensayos de laboratorio y campañas de campo) es esencial para determinar los puntos débiles de los enfoques predictivos. En este apartado se revisan los estudios experimentales referidos a playas heterogéneas como base para investigaciones futuras.

6.1. Ensayos de laboratorio

La medición en campo de los parámetros hidrodinámicos necesarios en modelos resulta compleja debido a la naturaleza enérgica de la zona de rompientes (Bradbury and Powell, 1992; Pedrozo-Acuña et al., 2007). Por ello, es necesaria la realización conjunta de ensayos a pequeña y a gran escala (1:1).

El último trabajo de relevancia en este ámbito fue el proyecto *Large Scale Modelling of Coarse Grained Beaches* (Estados Unidos, 2002), en el que se extrajeron las siguientes conclusiones: (1) La infiltración del perfil de playa es uno de los principales procesos que determinan la dirección dominante del transporte de sedimentos (Pedrozo-Acuña, 2005); (2) Existe una marcada diferencia entre la reflexión de playas heterogéneas y de grava (López de San Román-Blanco et al., 2006).

Tanto Holmes et al. (1996) como Quick and Dyksterhuis (1994) realizaron ensayos considerando tres perfiles de playa: uno de finos, otro de gruesos y otro mixto al 50%. Ambos comprobaron que se produjo transporte offshore y reducción de la pendiente en el primer perfil, efectos tanto mayores cuanto mayor es el contenido energético del oleaje. Holmes et al. (1996) destacaron la formación de una barra cuya posición se trasladó en dirección offshore durante el experimento. En el perfil de gruesos se originó transporte onshore, generándose una berma (Holmes et al., 1996) o una pequeña barra próxima al punto de rotura (Quick and Dyksterhuis, 1994).

La respuesta del perfil heterogéneo fue similar a la del perfil de finos, mostrando un comportamiento muy distante al compuesto por gruesos. Concluyeron que la arena gruesa en el seno de un lecho mixto es más móvil que cuando conforma una playa de sedimento unimodal, de acuerdo con lo propuesto por Miller and Byrne (1966). La infiltración y la rugosidad del lecho influyen en la variación del perfil, siendo la conductividad hidráulica el factor dominante. Quick and Dyksterhuis (1994) observaron, además, que en condiciones de baja y media energía el movimiento del sedimento en ambas direcciones fue mínimo, mientras que la respuesta ante oleajes de alto contenido energético se caracterizó por un transporte en dirección offshore de ambas fracciones.

Kuhnle (1994) estudió la iniciación del movimiento de sedimentos bimodales (arena y grava) considerando mezclas con distintas proporciones de grava. Comprobó que se produce en primer lugar el transporte offshore de la fracción de arena, quedando expuestos los sedimentos más gruesos, tal y como propusieron Parker and Klingeman (1982). Para mezclas con bajos porcentajes de arena, ésta queda incrustada entre los intersticios de los sedimentos más gruesos, sin producirse apenas transporte de la misma. Petrov (1989), en un ensayo 3D con distintas fracciones de arena y grava bien mezcladas, observó que la fracción de arena superficial fue eliminada, debido tanto al transporte (al igual que en el resto de ensayos) como a la infiltración de los sedimentos más finos entre los más gruesos, de acuerdo a lo propuesto por Kuhnle (1994). Concluyó también que el material grueso se concentra en las proximidades de la zona de rotura (Quick and Dyksterhuis, 1994) así como en el límite del *run-up*. Las partículas más esféricas fueron trasladadas hacia el mar, mientras que las más planas se movieron hacia tierra, de acuerdo con las observaciones de Orford (1975).

6.2. Campañas de campo

Los experimentos de pequeña y gran escala son muy útiles para la comprensión de los procesos de recuperación del perfil, sin embargo, la descripción de la dinámica de erosión y sedimentación de la playa requiere la realización de campañas de campo (Whitehouse, 2012).

Kulkarni et al. (2004) llevaron a cabo una campaña en Teignmouth (Inglaterra) en la que tomaron datos de la parte superior del perfil de playa (Figura 10). Concluyeron que: (1) La morfodinámica de la zona swash es variable tanto en el tiempo como en el espacio; (2) La secuencia erosión-acreción no responde solamente a un reajuste ante la acción de acciones hidrodinámicas (Holland and Puleo, 2001), sino que también es consecuencia de la variación del nivel freático debido al proceso

de infiltración/exfiltración durante el ascenso y descenso de la lamina de agua por el talud; (3) Las características del grano, la permeabilidad y la pendiente del perfil juegan un papel importante a la hora de determinar el comportamiento de la playa, conforme a lo observado en los ensayos por Holmes et al. (1996) y Quick and Dyksterhuis (1994). Van Wellen et al. (1997), Blewett et al. (2001) y Soulsby (2001), en base a los datos de distintas campañas, plantearon que el sedimento más fino tiende a ser depositado en las regiones más energéticas, como la cresta de las barras o la zona *swash*, de morfodinámica variable (Kulkarni et al., 2004).

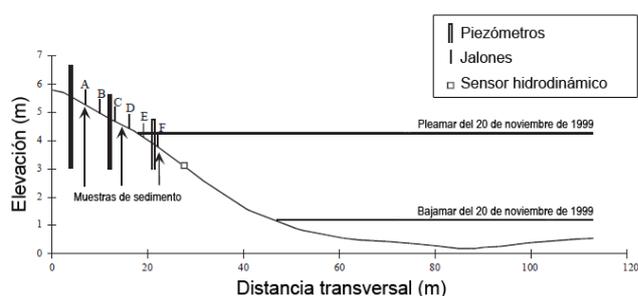


Figura 10: Localización de los instrumentos de medida en el perfil de playa (Kulkarni et al., 2004).

Miller (1997) y Brampton and Motyka (1987), a partir de distintas campañas en playas del Reino Unido, llegaron a las siguientes conclusiones: (1) Conforme aumenta la altura de ola, mayores son tanto la cantidad de arena transportada en dirección offshore como el transporte de la grava que queda expuesta, de acuerdo a lo propuesto por Quick and Dyksterhuis (1994); (2) El ratio de transporte longitudinal es menor cuanto mayor es la proporción de arena presente, por lo que grandes contenidos de arena aumentan la estabilidad de la playa. Según Miller (1997), además, bajas condiciones de energía son suficientes para iniciar el movimiento de la fracción de arena, deducción contraria a las observaciones de Quick and Dyksterhuis (1994) en condiciones de baja y media energía.

Mason et al. (1997), basándose en un estudio de la playa de Morfa Dyffryn (Gales), propusieron que en playas de altas pendientes predomina el efecto de la reflexión sobre la disipación de energía por infiltración, en concordancia con lo afirmado por López de San Román-Blanco et al. (2006). Nordstrom and Jackson (1993) comprobaron que en condiciones de alta energía se produce un transporte de ambas fracciones (arena y grava), tal y como observaron Quick and Dyksterhuis (1994), Brampton and Motyka (1987) y Miller (1997), dando lugar a la formación de terrazas mareales. En condi-

ciones de baja energía, la arena se transporta preferentemente hacia tierra, mientras que las gravas también vuelven a su posición inicial pero con un cierto desfase temporal, idea que se opone a los resultados de Quick and Dyksterhuis (1994). La proporción de arena se reduce durante los meses de invierno debido al transporte *offshore* como consecuencia de las tormentas (McKay and Terich, 1992).

Walker et al. (1991) plantearon que: (1) La mayor parte del transporte ocurre en la zona swash, de acuerdo con Kulkarni et al. (2004), debido principalmente al ascenso y descenso del flujo incidente, siendo el asociado a corrientes longitudinales prácticamente despreciable; (2) El transporte asociado al refluo es menor en playas heterogéneas que en playas de arena debido a su mayor permeabilidad, lo cual deriva en una mayor deposición en la parte alta del perfil de playa, pudiendo generarse bermas, conforme a lo obtenido por Holmes et al. (1996) y Quick and Dyksterhuis (1994); (3) Sólo el 1 o 2 % del transporte longitudinal corresponde a gravas.

Otros estudios basados en campañas de campo han sido realizados por Kirk (1969), Nicholls (1985), Van Wellen et al. (1998) y Pontee (1996). Este último encontró una gran variabilidad en la composición de sedimentos bajo condiciones de forzamiento similares, lo cual evidencia que los procesos a corto plazo son importantes así como que no es suficiente analizar las variaciones de sedimento y del perfil de playa, sino que es necesario un estudio conjunto de datos hidrodinámicos de alta frecuencia (Mason and Coates, 2001).

7. Resultados

Los registros de superficie libre en los puntos de medida indican, en los cuatro perfiles tipo definidos, que el oleaje se va haciendo más irregular conforme asciende por el talud por efecto del fondo (asomeramiento) hasta que se produce la rotura de la ola, momento a partir del cual los valores de superficie libre muestran una clara disminución (Figura 12). Los mayores valores de superficie libre se presentan generalmente en el *Basic State*, mostrando menor magnitud cuanto mayor es el espesor de sedimento poroso sobre el mismo (Figura 11). Las magnitudes registradas en el último perfil, constituido por una capa de gruesos y otra de finos sobre el lecho impermeable, son considerablemente menores que las del resto. La profundidad de rotura varía en función tanto de las condiciones de forzamiento como de la geometría del perfil: aumenta con el periodo y decrece en cada perfil tipo con respecto al anterior. El tipo de rotura y el rango en el que oscila la profundidad de la misma se exponen en la tabla 5.

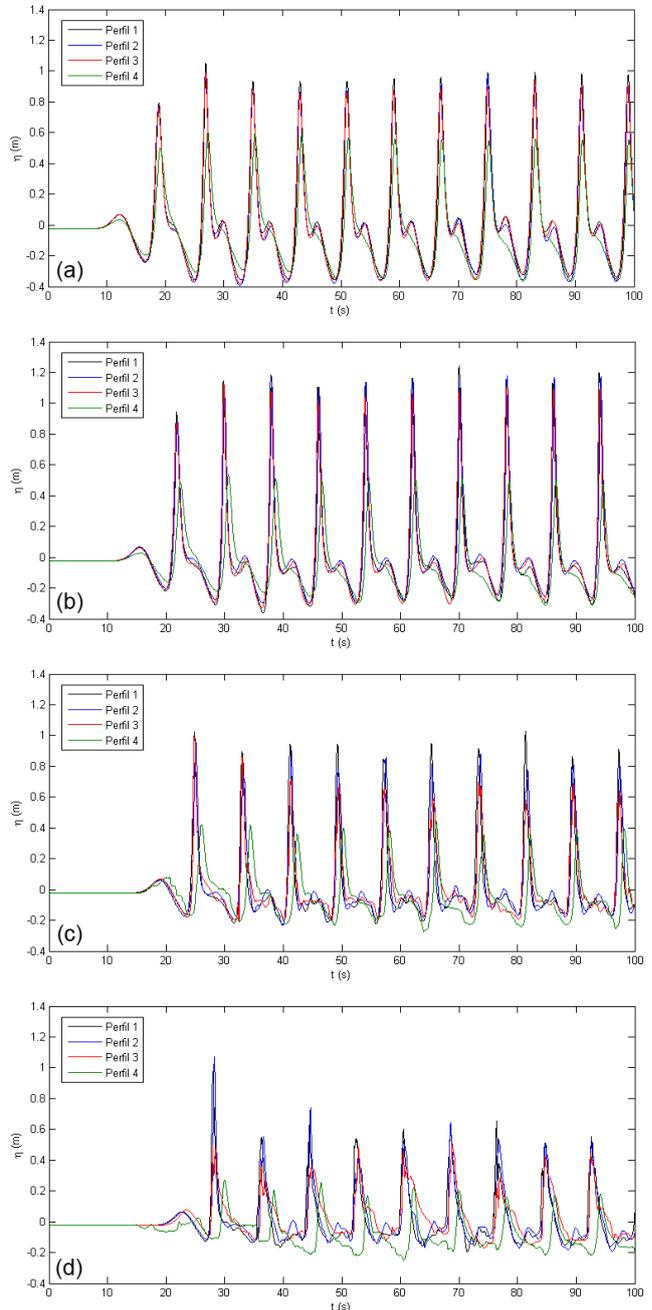


Figura 11: Valores de superficie libre para un oleaje de periodo medio. (a) Punto de media 3. (b) Punto de media 6. (c) Punto de media 9. (d) Punto de media 12.

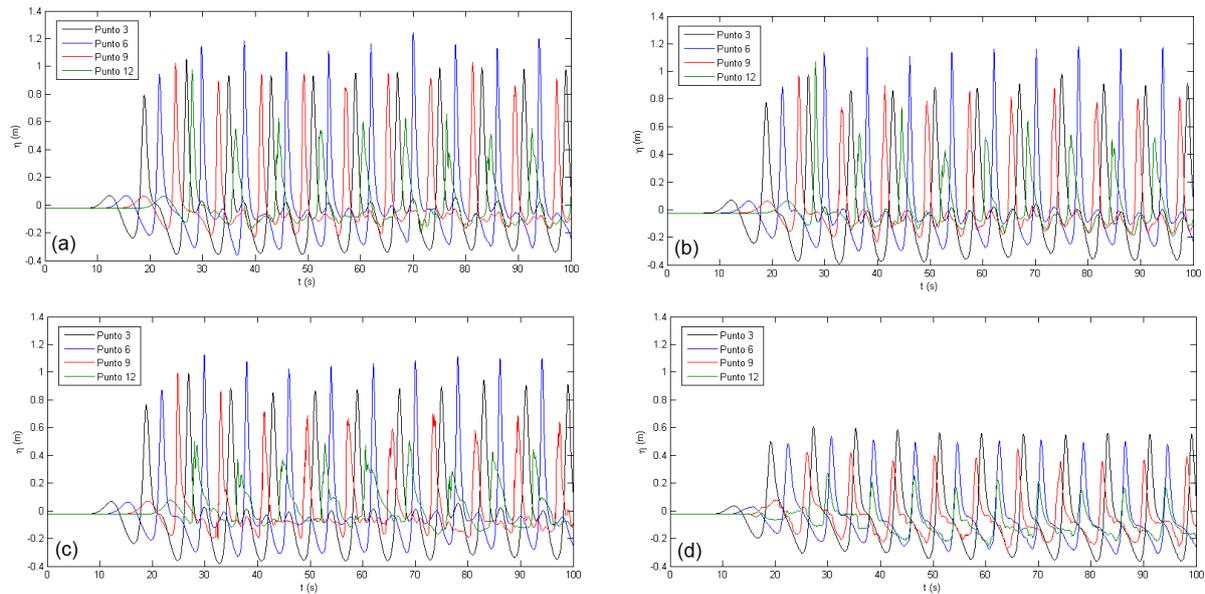


Figura 12: Valores de superficie libre registrados en los puntos de medida 3, 6, 9 y 12 para un oleaje de periodo medio. (a) Perfil 1. (b) Perfil 2. (c) Perfil 3. (d) Perfil 4.

Caso	Tipo rotura	h_b (m)
1A	Decrestamiento	1.17–1.33
1B	Decrestamiento	1.5–1.67
1C	Voluta	1.67–1.83
2A	Decrestamiento	0.72–0.78
2B	Decrestamiento	1.12–1.28
2C	Voluta	1.45–1.62
3A	Decrestamiento	0.42–0.58
3B	Decrestamiento	1.08–1.25
3C	Voluta	1.42–1.58
4A	Decrestamiento	0.37–0.53
4B	Decrestamiento	0.87–1.03
4C	Voluta	1.03–1.2

Tabla 5: Tipo y rango de profundidad de rotura en cada caso.

Los registros de velocidad horizontal muestran, inicialmente, alternancia entre valores positivos (menores de 2 m/s) y valores nulos, cuyos intervalos temporales son función del oleaje de cálculo considerado. Este comportamiento se mantiene hasta que se hace sensible el efecto de la reflexión, momento en el que comienzan a aparecer valores negativos (reflujo). Al producirse la rotura, la velocidad horizontal aumenta considerablemente, apareciendo valores pico tanto mayores cuanto menos permeable es el perfil. Considerando puntos fijos del talud, generalmente las velocidades son mayores en el *Basic State* y destacan, por su baja magnitud, los valores registrados en el perfil 4 (Figura 14). En el punto 14, situado en la zona *swash*, las mayores velocidades de reflujo tienen lugar en el primer perfil, presentando el resto registros más asimétricos (Figura 13).

A partir de los valores aproximados obtenidos para la profundidad de rotura (Tabla 5) se puede cuantificar el transporte potencial de sedimentos a lo largo de la línea de costa (Ecuación 14), considerando como características del sedimento las propias de una playa de finos en el primer perfil y de una heterogénea en los tres restantes (Figura 9). Se adopta un ángulo de incidencia del oleaje de $\Pi/16$ radianes por ser la dirección dominante en la zona de estudio, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 6. Según la aproximación de Sunamura and Horikawa (1974), predominarían los efectos erosivos en los tres primeros casos, produciéndose acreción en los nueve restantes (Ecuación 13).

Caso	$h_{b,aprox}$ (m)	Q (m ³ /s)
1A	1.25	0.0374
1B	1.585	0.0421
1C	1.75	0.0443
2A	0.75	0.0227
2B	1.2	0.0288
2C	1.535	0.0325
3A	0.5	0.0186
3B	1.165	0.0284
3C	1.5	0.0322
4A	0.45	0.0176
4B	0.95	0.0256
4C	1.115	0.0277

Tabla 6: Tasa potencial de transporte longitudinal de sedimento en cada caso.

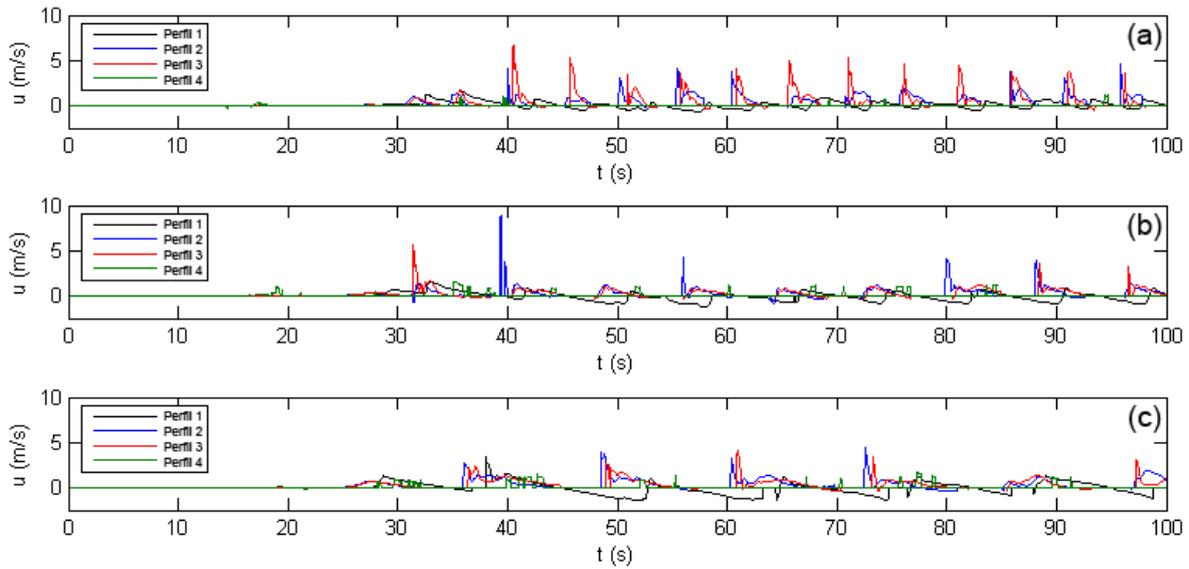


Figura 13: Registros de velocidades horizontales en el punto 14. (a) Periodo corto. (b) Periodo medio. (c) Periodo largo

8. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo muestran que, en el caso de pendiente constante, cuanto mayor es la infiltración, menores son la altura y la velocidad horizontal, es decir, mayor es la importancia de la disipación frente a la reflexión. Además, las velocidades de reflujos obtenidas en perfiles heterogéneos son menores a las del perfil de arena, por lo que el transporte asociado al mismo también será menor, de acuerdo con lo observado por Walker et al. (1991). De este modo, la infiltración es uno de los principales procesos que determinan el transporte de sedimentos, tal y como concluyeron Pedrozo-Acuña (2005) a partir de ensayos de laboratorio y Kulkarni et al. (2004) mediante medidas de campo, entre otros. En referencia a la rotura, se comprueba que la ola pasa de tener un perfil superficial continuo a otro con discontinuidades así como que en playas heterogéneas las olas rompen a menor profundidad que en las de arena (Tabla 5), generando una zona de rompientes más estrecha (Buscombe and Masselink, 2006). Por contra, a pesar de que los resultados en el perfil 4 se muestran acordes a las conclusiones de Miller (1997), sus valores parecen estar subestimados.

En cuanto a la aplicación de la formulación de Milano (2008), las soluciones indican que el transporte longitudinal será tanto mayor cuanto mayor sean el porcentaje de arena y el periodo del oleaje incidente. La tendencia de los mismos se ajusta a datos experimentales de laboratorio (Kuhnle, 1994) y campo (Kulkarni et al., 2004),

pero es contraria a otras conclusiones basadas en campañas de campo (Miller, 1997; Brampton and Motyka, 1987). Por su parte, la relación acreción-erosión de Sunamura and Horikawa (1974) se muestra acorde con las conclusiones de Kulkarni et al. (2004), Miller (1997) y Kuhnle (1994), pero discrepa con las propias de Holmes et al. (1996).

9. Conclusiones

Las playas heterogéneas están compuestas por un amplio rango de tamaños de sedimento, mezclados tanto en profundidad como transversal y longitudinalmente. Al contrario que las playas homogéneas, la morfodinámica de las playas heterogéneas no ha sido descrita de forma precisa. Este hecho, unido al previsible aumento del nivel del mar y, en el caso de España, a la aprobación de la nueva Ley de Costas, justifica la necesidad de caracterizar los procesos morfológicos e hidrodinámicos de este tipo de playas.

En este trabajo se ha hecho una amplia revisión bibliográfica sobre playas heterogéneas, prestando especial atención a las particularidades de éstas así como a las formulaciones analíticas que permiten cuantificar los procesos de interacción hidrodinámica-playa. La mayor parte de ellas consideran la pendiente del perfil de playa como un factor clave.

Han sido descritos un modelo hidrodinámico y otro morfodinámico, aplicando el primero de ellos a una serie de perfiles tipo con unas hipótesis de partida y unas

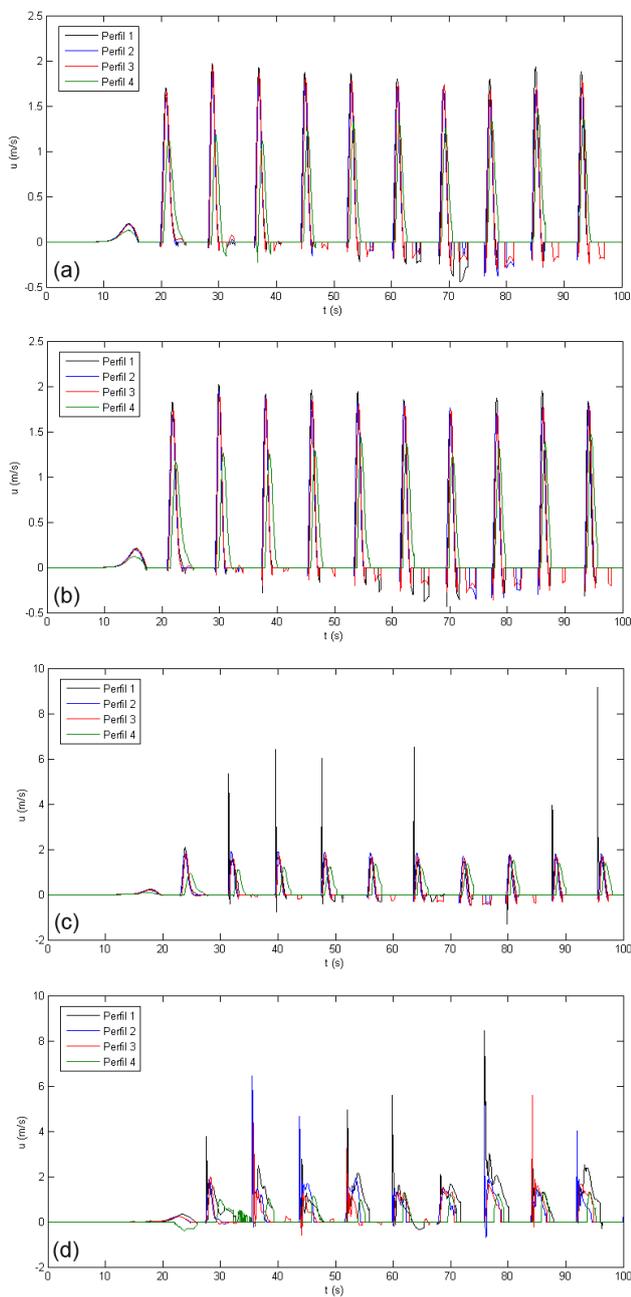


Figura 14: Registros de velocidades horizontales medidos en los puntos 3, 6, 9 y 12 para un oleaje de periodo medio. (a) Perfil 1. (b) Perfil 2. (c) Perfil 3. (d) Perfil 4.

condiciones de forzamiento, iniciales y de contorno determinadas. Los resultados han manifestado la influencia del tamaño y distribución del sedimento en la hidrodinámica. La infiltración ha mostrado una relación directa con la disipación de energía e inversa con la reflexión, el reflujo y la profundidad de rotura. Así mismo, se ha cuantificado la tasa potencial de transporte longitudinal a partir de una formulación desarrollada en el *Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni* de la Universidad de Pisa (Milano, 2008), evidenciando ésta una relación directa con el porcentaje de finos y el contenido energético del oleaje. A partir de la aproximación de Sunamura and Horikawa (1974), se ha determinado la importancia relativa de la erosión frente a la acreción en cada uno de los casos estudiados.

Finalmente, han sido revisados los trabajos de laboratorio y campo relativos a este tipo de playas. Se ha comprobado que, en general, las conclusiones derivadas de los mismos se ajustan a los resultados obtenidos. No obstante, existen algunas discrepancias entre ambos, lo cual sugiere que es preciso emprender nuevas líneas de investigación en este ámbito.

10. Futuras líneas de investigación

En primer lugar, se propone considerar en el IH-2VOF perfiles tipo de distintas pendientes y con variación transversal de tamaños del sedimento, con objeto de cuantificar la influencia de estos dos factores en los procesos hidrodinámicos. Para considerar la gradación longitudinal del sedimento se podría emplear el modelo hidrodinámico IH-3VOF (Lara et al., 2012), basado en el TRUCHAS (Rider and Kothe, 1998). Resultaría de interés aplicar a los resultados de ambos modelos el método de Baquerizo et al. (1998), que determina de forma precisa la reflexión y disipación de energía del oleaje incidente.

Por su parte, para poder acoplar efectos hidrodinámicos y morfológicos se recomienda realizar simulaciones con el modelo XBEACH, presentado en este Trabajo Fin de Máster. Se ha probado su validez tanto en playas de arena (Roelvink et al., 2009) como en playas de grava (Turner and Masselink, 2012; Williams et al., 2012), por lo que es esperable obtener aceptables resultados también en el caso de playas heterogéneas. Sus resultados podrían ser contrastados a partir del modelo $D - EC^2$ (Cobos and Baquerizo, 2013).

Se sugiere, además, revisar la configuración experimental de trabajos de campo realizados hasta ahora como base para el diseño y posterior realización de campañas, tanto periódicas como puntuales, en las zonas de

estudio. Se obtendrían datos en la zona de rompientes y en el frente de playa que permitan discutir la validez de modelos numéricos y formulaciones analíticas. Se contempla, finalmente, la posibilidad de realizar ensayos en el tanque direccional de oleaje y/o en el canal ola-corriente de los que dispone el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales como complemento a formulaciones, modelos y campañas de cara al avance en el conocimiento de estas complejas tipologías costeras.

Apéndice A. Formulación IH-2VOF

Ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{1 + c_A} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho(1 + c_A)}$$

$$\left(-\frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + \rho g_i \right) - \frac{1}{1 + c_A}$$

$$\left(\frac{\alpha \nu (1 - n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta (1 - n)}{n D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_i \rangle^2 + \langle \bar{u}_j \rangle^2} \bar{u}_i \right)$$

Donde \bar{u}_i , u'_i , \bar{u}_j y u'_j son las componentes medias y fluctuantes de la velocidad en las direcciones i y j , respectivamente; \bar{P} la componente media de la presión; $\bar{\tau}_{ij}$ el promedio del tensor de tensiones viscosas; mientras que c_A , α y β son coeficientes que se obtienen como:

$$c_A = 0,34 \frac{1 - n}{n}$$

$$\alpha = 4409,22 D_{50}^{0,43}$$

$$\beta = 12,27 \frac{n^3}{(1 - n)^{1,5}} D_{50}^{-0,1075}$$

Apéndice B. Formulación XBEACH

Concentración de equilibrio a una profundidad h :

$$C_{eq} = \frac{A_{sb}}{h} \left(\sqrt{u_E^2 + 0,64 u_{rms,2}^2 - u_{crit}^2} \right)^{1,5} + \frac{A_{ss}}{h} \left(\sqrt{u_E^2 + 0,64 u_{rms,2}^2 - u_{crit}^2} \right)^{2,4}$$

Siendo A_{sb} y A_{ss} los coeficientes de arrastre por fondo y transporte en suspensión, respectivamente, u_{crit} el

umbral de velocidad de arrastre de sedimentos, u_E la velocidad euleriana del flujo y $u_{rms,2}$ una velocidad calculada como:

$$u_{rms,2} = \sqrt{u_{rms}^2 + 1,45 k_b}$$

Donde k_b considera el efecto de la turbulencia inducida por la rotura de la ola cerca del fondo (Van Thiel de Vries, 2009) y u_{rms} es la velocidad orbital pico:

$$u_{rms} = \frac{\pi H_{rms}}{\sqrt{2} T_m \sinh k_w h}$$

Siendo T_m el periodo medio y k_w el número de onda. Velocidad crítica:

$$u_{cr} = \alpha u_{crit,c} + (1 - \alpha) u_{crit,w}$$

$$\alpha = \frac{u_E}{u_E + u_{rms,2}}$$

Donde $u_{crit,c}$ es la velocidad crítica de transporte para las corrientes (Van Rijn, 1993) y $u_{crit,w}$ el flujo crítico para el oleaje (Komar and Miller, 1975).

Variación en el nivel del lecho:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{1 - n} \frac{\partial Sed_x}{\partial x}$$

Transporte de sedimento en la dirección x :

$$Sed_x = h C (u_E + u_A \sin(\theta_m)) \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

C es la concentración de sedimento promediada en profundidad, θ_m el ángulo de incidencia del oleaje, u_A el flujo medio de la componente correspondiente y D_h un coeficiente de difusión que se obtiene como el producto de la viscosidad horizontal (ν_h) por un factor de calibración ($\gamma_{visc} \approx 1$), según Van Thiel de Vries (2009).

Agradecimientos

Quisiera expresar mi agradecimiento a las Universidades de Granada, Córdoba y Málaga por la organización del Máster Oficial Interuniversitario en Hidráulica Ambiental, en el seno del cual se enmarca este trabajo. Así mismo, me gustaría dar las gracias al Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales del Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía por su colaboración, haciendo mención especial al Dr. Miguel Ortega Sánchez, tutor del trabajo. Sin su orientación, dedicación y constante apoyo no hubiera sido posible la realización del mismo.

Referencias

- Austin, M.J., Masselink, G., 2006. Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach. *Marine Geology* 229, 59–77.
- Baquerizo, A., Losada, M.A., López, M., 2005. Fundamentos del movimiento oscilatorio. Universidad de Granada.
- Baquerizo, A., Losada, M.A., Smith, J.M., 1998. Wave reflection from beaches: A predictive model. *Journal of coastal research*, 291–298.
- Battjes, J.A., 1974. Surf similarity. *Coastal Engineering Proceedings* 1.
- Blewett, J.C., Holmes, P., Horn, D.P., 2001. Field measurements of swash on gravel beaches, in: *Coastal Sediments (2001)*, ASCE. pp. 828–837.
- Bradbury, A.P., Powell, K.A., 1992. The short term profile response of shingle spits to storm wave action. *Coastal Engineering Proceedings* 1.
- Bramato, S., Ortega-Sánchez, M., Mans, C., Losada, M.A., 2012. Natural Recovery of a Mixed Sand and Gravel Beach after a Sequence of a Short Duration Storm and Moderate Sea States. *Journal of Coastal Research* 279, 89–101.
- Brampton, A.H., Motyka, J.M., 1987. Recent examples of mathematical models of uk beaches, in: *Coastal Sediments (1987)*, ASCE. pp. 515–530.
- Buscombe, D., Masselink, G., 2006. Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews* 79, 33–52.
- Camenen, B., Larroude, P., 2003. Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment. *Coastal Engineering* 48, 111–132.
- Carter, R.W.G., Orford, J.D., 1984. Coarse clastic barrier beaches: a discussion of the distinctive dynamic and morphosedimentary characteristics. *Marine Geology* 60, 377–389.
- Carter, R.W.G., Orford, J.D., 1993. The morphodynamics of coarse clastic beaches and barriers: a short-and long-term perspective. *Journal of Coastal Research*, 158–179.
- Chesnutt, C.B., 1978. *Laboratory Effects in Beach Studies. Volume VIII. Analysis of Results from 10 Movable-Bed Experiments. Technical Report. DTIC Document.*
- Cobos, M., Baquerizo, A., 2013. Evaluación de la evolución de la costa mediante un modelo basado en procesos. Master's thesis. Universidades de Granada, Córdoba y Málaga.
- Davies, J.L., Clayton, K.M., 1980. Geographical variation in coastal development. volume 1522168. Longman London.
- Galappatti, R., 1983. A depth integrated model for suspended transport. Technical Report. Delft University of Technology.
- Guanche, R., Losada, I.J., Lara, J.L., 2009. Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability. *Coastal Engineering* 56, 543–558.
- Higuera, P., del Jesus, M., Lara, J.L., Losada, I.J., Guanache, Y., Barajas, G., 2012. Numerical simulation of three-dimensional breaking waves on a gravel slope using a two-phase flow Navier Stokes model. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 246, 144–152.
- Holland, K.T., Elmore, P.A., 2008. A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth-Science Reviews* 89, 116–134.
- Holland, K.T., Puleo, J.A., 2001. Variable swash motions associated with foreshore profile change. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 106, 4613–4623.
- Holmes, P., Baldock, T.E., Chan, R.T.C., Neshaei, M.A.L., 1996. Beach evolution under random waves. *Coastal Engineering Proceedings* 1.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Herbers, T.H.C., 1989. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering* 13, 23–54.
- Horn, D.P., 2002. Beach groundwater dynamics. *Geomorphology* 48, 121–146.
- Horn, D.P., Walton, S.M., 2007. Spatial and temporal variations of sediment size on a mixed sand and gravel beach. *Sedimentary Geology* 202, 509–528.
- Hsu, T.J., Sakakiyama, T., Liu, P.L.F., 2002. A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breaker. *Coastal Engineering* 46, 25–50.
- Iribarren, R., Nogales, C., 1964. *Obras marítimas*. Editorial Dossat, Madrid, España.
- Jennings, R., Shulmeister, J., 2002. A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology* 186, 211–228.
- Karunaratna, H., Horrillo-Caraballo, J.M., Ranasinghe, R., Short, A.D., Reeve, D.E., 2012. An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach. *Marine Geology* 299–302, 33–42.
- Kirk, R.M., 1969. Beach erosion and coastal development in the canterbury bight. *New Zealand Geographer* 25, 23–35.
- Kirk, R.M., 1980. Mixed sand and gravel beaches: morphology, processes and sediments. *Progress in Physical Geography* 4, 189–210.
- Komar, P.D., Inman, D.L., 1970. Longshore sand transport on beaches. *Journal of geophysical research* 75, 5914–5927.
- Komar, P.D., Miller, M.C., 1975. On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold; reply. *Journal of Sedimentary Research* 45, 362–367.
- Kuhnle, R.A., 1994. Incipient motion of sand-gravel sediment mixtures. *Journal of Hydraulic Engineering* 119, 1400–1415.
- Kulkarni, C.D., Levoy, F., Monfort, O., Miles, J., 2004. Morphological variations of a mixed sediment beachface (Teignmouth, UK). *Continental Shelf Research* 24, 1203–1218.
- Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J., 2006. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering* 53, 395–417.
- Lara, J.L., del Jesus, M., Losada, I.J., 2012. Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. *Coastal Engineering* 64, 26–46.
- Lara, J.L., Losada, I.J., Guanache, R., 2008. Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering* 35, 1388–1400.
- Lara, J.L., Losada, I.J., Maza, M., Guanache, R., 2011. Breaking solitary wave evolution over a porous underwater step. *Coastal Engineering* 58, 837–850.
- Lara, J.L., Ruju, A., Losada, I.J., 2010. Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 467, 1215–1242.
- Li, F., Dyt, C., Griffiths, C., 2006. Multigrain sedimentation/erosion model based on cross-shore equilibrium sediment distribution: Application to nourishment design. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67, 664–672.
- Lin, P., Liu, P.L.F., 1999. Internal wave-maker for navier-stokes equations models. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 125, 207–215.
- Liu, P.L.F., Lin, P., Chang, K.A., Sakakiyama, T., 1999. Numerical modeling of wave interaction with porous structures. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 125, 322–330.
- López de San Román-Blanco, B., 2004. Dynamics of gravel and mixed sand and gravel beaches. Ph.D. thesis. University of London.
- López de San Román-Blanco, B., Coates, T.T., Holmes, P., Chadwick, A.J., Bradbury, A., Baldock, T.E., Pedrozo-Acuña, A., Lawrence, J., Grüne, J., 2006. Large scale experiments on gravel and mixed beaches: Experimental procedure, data documentation and initial

- results. *Coastal Engineering* 53, 349–362.
- López de San Román-Blanco, B., Holmes, P., 2002. Further insight on behaviour of mixed sand and gravel beaches-large scale experiments on profile development, in: *Coastal Engineering Conference, ASCE*. pp. 2651–2663.
- Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R., González-Ondina, J.M., 2008. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* 55, 47–62.
- Losada, M.A., 2009. Recomendaciones para Obras Marítimas 1.0-09: Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo. Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Losada, M.A., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Santiago, J.M., Sánchez, E., 2009. Socioeconomic and environmental risk in coastal and ocean engineering, in: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Ed. Young C. Kim, World Scientific Co.. pp. 923–952.
- Mason, T., Coates, T.T., 2001. Sediment transport processes on mixed beaches: a review for shoreline management. *Coastal Research* 17, 645–657.
- Mason, T., Voulgaris, G., Simmonds, D.J., Collins, M.B., 1997. Hydrodynamics and sediment transport on composite (mixed sand/shingle) and sand beaches: a comparison, in: *Coastal Dynamics, ASCE*. pp. 48–57.
- Masselink, G., Li, L., 2001. The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Marine Geology* 176, 139–156.
- Matias, A., Williams, J.J., Masselink, G., Ferreira, O., 2012. Overwash threshold for gravel barriers. *Coastal Engineering* 63, 48–61.
- McDougal, W.G., 1993. State of the art practice in coastal engineering. Lecture Notes, National Cheng Kung University, Taiwan, 10–25.
- McKay, P.J., Terich, T.A., 1992. Gravel barrier morphology: Olympic national park, Washington state, USA. *Journal of Coastal Research*, 813–829.
- Miche, A., 1951. Le pouvoir r {é} fl {é} chissant des ouvrages maritimes expos {é} s {à} l' action de la houle. *Annales des Ponts et Chauss {é} es* 121, 285–319.
- Milano, V., 2008. *Idraulica Marittima*. Maggioli Editore.
- Miller, K.A., 1997. *Sediment Dynamics on Wemyss Beach, South Fife*. Ph.D. thesis. University of St Andrews.
- Miller, R.L., Byrne, R.J., 1966. The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed. *Sedimentology* 6, 303–314.
- Nairn, R.B., Roelvink, J.A.D., Southgate, H.N., 1990. Transition zone width and implications for modeling surfzone hydrodynamics. *Coastal Engineering Proceedings* 1.
- Nicholls, R.J., 1985. The stability of shingle beaches in the eastern half of Christchurch Bay. Ph.D. thesis. University of Southampton.
- Nielsen, P., Hanslow, D.J., 1991. Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 1139–1152.
- Nielsen, P., Kang, H.Y., 1996. Groundwater dynamics in beaches and coastal barriers, in: *International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments*, pp. 521–532.
- Noli, A., Marini, M., 1992. Studio con modelli matematici di un intervento di protezione costiera e ripascimento artificiale. Litorale di Marina di Pisa. Technical Report. Dipartimento di Ingegneria dell' Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni. Università di Pisa.
- Nordstrom, K.F., Jackson, N.L., 1993. Distribution of surface pebbles with changes in wave energy on a sandy estuarine beach. *Journal of Sedimentary Research* 63, 1152–1159.
- Orford, J.D., 1975. Discrimination of particle zonation on a pebble beach. *Sedimentology* 22, 441–463.
- Ortega-Sánchez, M., Bramato, S., Quevedo, E., Mans, C., Losada, M.A., 2008. Atmospheric-hydrodynamic coupling in the nearshore. *Geophysical Research Letters* 35.
- Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., Baquerizo, A., 2003. On the development of large-scale cusped features on a semi-reflective beach: Carchuna beach, Southern Spain. *Marine Geology* 198, 209–223.
- Parker, G., Klingeman, P.C., 1982. On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research* 18, 1409–1423.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Reeve, D.E., 2008. Wave-impact characteristics of plunging breakers acting on gravel beaches. *Marine Geology* 253, 26–35.
- Pedrozo-Acuña, A., Torres-Freyermuth, A., Zou, Q., Hsu, T.J., Reeve, D.E., 2010. Diagnostic investigation of impulsive pressures induced by plunging breakers impinging on gravel beaches. *Coastal Engineering* 57, 252–266.
- Pedrozo-Acuña, A., 2005. Concerning swash on steep beaches. Ph.D. thesis. Ph.D. thesis, University of Plymouth, UK.
- Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Chadwick, A.J., Silva, R., 2007. A numerical-empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand-gravel beaches. *Marine Geology* 241, 1–18.
- Petrov, V.A., 1989. The differentiation of material on gravel beaches. *Oceanology* 29, 208–212.
- Pontee, N.I., 1996. *The Morphodynamics and Sedimentary Architecture of Mixed Sand and Gravel Beaches*, Suffolk, UK. Ph.D. thesis. Department of Sedimentology, University of Reading.
- Pontee, N.I., Pye, K., Blott, S.J., 2004. Morphodynamic behaviour and sedimentary variation of mixed sand and gravel beaches, Suffolk, UK. *Journal of Coastal Research*, 256–276.
- Quick, M.C., Dyksterhuis, P., 1994. Cross-shore transport for beaches of mixed sand and gravel, in: *International Symposium: Waves-Physical and Numerical Modeling*. Canadian Society of Civil Engineers, pp. 1443–1452.
- Rider, W.J., Kothe, D.B., 1998. Reconstructing volume tracking. *Journal of computational physics* 141, 112–152.
- Roelvink, D., Reniers, A.D., Van Dongeren, A.P., Van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56, 1133–1152.
- Ruju, A., Lara, J.L., Losada, I.J., 2012. Radiation stress and low-frequency energy balance within the surf zone: A numerical approach. *Coastal Engineering* 68, 44–55.
- Schwartz, R.K., Birkemeier, W.A., 2004. Sedimentology and morphodynamics of a barrier island shoreface related to engineering concerns, outer banks, NC, USA. *Marine Geology* 211, 215–255.
- Shih, T.H., Zhu, J., Lumley, J.L., 1996. Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 23, 1133–1144.
- Short, A.D., 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*.
- Soulsby, R.L., 2001. Sediment transport and morphodynamics on complex coastlines-the coast3d project, in: *Coastal Dynamics, ASCE*. pp. 92–101.
- Stelling, G.S., Verwey, A., 2005. Numerical flood simulation. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*.
- Stive, M.J.F., Dingemans, M.W., 1984. Calibration and verification of a one dimensional wave energy decay model. Report on investigation, TOW.
- Sunamura, T., Horikawa, K., 1974. Two-dimensional beach transformation due to waves. *Coastal Engineering Proceedings* 1.
- Thaxton, C.S., Calantoni, J., Drake, T.G., 2001. Can a single representative grain size describe bed load transport in the surf zone? *EOS Transactions-American Geophysical Union*.
- Thompson, C.E.L., Williams, J.J., Metje, N., Coates, L.E., Pacheco, A., 2012. Turbulence based measurements of wave friction factors under irregular waves on a gravel bed. *Coastal Engineering* 63, 39–47.
- Torres-Freyermuth, A., Losada, I.J., Lara, J.L., 2007. Modeling of surf zone processes on a natural beach using Reynolds-Averaged

- Navier-Stokes equations. *Journal of Geophysical Research* 112, C09014.
- Turner, I.L., Masselink, G., 1998. Swash infiltration-exfiltration and sediment transport. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012) 103, 30813–30824.
- Turner, I.L., Masselink, G., 2012. Coastal gravel barrier hydrology – Observations from a prototype-scale laboratory experiment (BARDEX). *Coastal Engineering* 63, 13–22.
- Van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. volume 1006. Aqua publications Amsterdam.
- Van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 649–667.
- Van Thiel de Vries, J.S.M., 2009. Dune erosion during storm surges. Ph.D. thesis. TU Delft, Delft University of Technology.
- Van Wellen, E., Chadwick, A.J., Bird, P.A.D., Bray, M., Lee, M., Morfett, J., 1997. Coastal sediment transport on shingle beaches, in: *Coastal Dynamics*, ASCE. pp. 38–47.
- Van Wellen, E., Chadwick, A.J., Mason, T., 2000. A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering* 40, 243–275.
- Van Wellen, E., Chadwick, A.J., Lee, M., Baily, B., Morfett, J., 1998. Evaluation of longshore sediment transport models on coarse grained beaches using field data: A preliminary investigation. *Coastal Engineering Proceedings* 1.
- Veeramony, J., Svendsen, I.A., 2000. The flow in surf-zone waves. *Coastal Engineering* 39, 93–122.
- Walker, J.R., Everts, C.H., Schmelig, S., Demirel, V., 1991. Observations of a tidal inlet on a shingle beach, in: *Coastal Sediments* (1991), ASCE. pp. 975–989.
- Walstra, D.J.R., Roelvink, J.A., Groeneweg, J., 2000. Calculation of wave-driven currents in a 3d mean flow model, in: *Coastal Engineering*, ASCE. pp. 1050–1063.
- Whitehouse, R.J.S., 2012. BARDEX: A large-scale laboratory study of gravel barrier dynamics. *Coastal Engineering* 63, 1–2.
- Williams, J.J., Buscombe, D., Masselink, G., Turner, I.L., Swinkels, C., 2012. Barrier dynamics experiment (BARDEX): Aims, design and procedures. *Coastal Engineering* 63, 3–12.
- Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology* 56, 93–118.