

Un parámetro de diseño para perfiles de playa apoyados en laja rocosa. Metodología aplicada a Cádiz

Contreras, Antonio^a; Gómez-Pina, Gregorio^a; Muñoz-Pérez, Juan José^a; Contreras, Francisco^a;
Chamorro, Gabriel^b; Cabrera, Pablo^a

^aGrupo de Investigación de Ingeniería Costera de la Univ. de Cádiz, Puerto Real, 11510. Cádiz. antonio.contreras@uca.es, gregoriopina@yahoo.es, juanjose.munoz@uca.es, francisco.contreras@uca.es, ^bETSI Univ. de Sevilla, Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, Camino de los Descubrimientos S/N, 41092. Sevilla. gchamorro1@us.es.

Resumen

Este artículo está basado de la recopilación de datos de perfiles de playa en el litoral de la provincia de Cádiz, con el objetivo de analizar dichos datos y proponer nuevas formulaciones sobre los parámetros de diseño del perfil de equilibrio en playas apoyadas en laja rocosa, de aplicación, a los futuros proyectos de regeneraciones de playa en dicho litoral.

El litoral de la provincia de Cádiz (sobre todo la zona atlántica) se encuentra ubicada en una zona con marea (mesomareal), que hace que el perfil de equilibrio que se desarrolle en dos tramos diferenciados, el tramo de rotura y el de asomeramiento. Estos dos tramos dan lugar al perfil típico biparabólico existente en mares con marea.

La existencia de zonas con lajas/rocas que interrumpe el desarrollo normal del perfil típico biparabólico hace que se desarrollen distintas tipologías de perfil de playa. Es por tanto fundamental, identificar correctamente la tipología del tramo de playa a estudiar, para a partir de ahí, establecer los parámetros característicos que define el perfil de playa, con el objeto de su aplicación en futuras regeneraciones.

El clima marítimo de la zona, el grado de exposición de los perfiles de playa, así como las características de los sedimentos van a ser los factores condicionantes principales para la determinación de los parámetros de diseño.

El objetivo, por tanto, es la determinación de nuevas formulaciones sobre los parámetros de diseño del perfil de equilibrio de playas apoyadas en laja rocosa en mares con marea. Dichas formulaciones, han sido aplicadas y modeladas sobre los propios perfiles existentes que han servido de base para la realización de este trabajo, con el objeto de cuantificar el error existente entre el perfil real y el modelado. Dicho análisis comparativo se ha hecho extensivo, con las formulaciones propuestas por otros autores anteriores, obteniéndose mejores resultados con las nuevas formulaciones.

Palabras clave: Playas, perfil de equilibrio, monoparabólico, biparabólico, lajas, marea

1 Introducción

Un proyecto de regeneración de playa requiere identificar los parámetros fundamentales que definen del perfil de equilibrio. Como ya han expuesto algunos autores previamente (Gómez-Pina, 2001), dicho perfil de equilibrio depende de la tipología de perfil existente, dado que dicha tipología condiciona sus parámetros de diseño.

De forma general podemos definir el perfil de equilibrio como la situación o estado al que llega un perfil de playa, en situación de oleaje constante, durante un tiempo suficiente.

Diferentes autores Fenneman (1902), Johnson (1919), Bruun (1981), Schwartz (1982), Moore (1982), Larson y Kraus (1989), Larson (1991), Kriebel et al (1991), Pilkey et al. (1993) han definido el concepto de perfil de equilibrio.

Dean (1983) lo definió como: “una idealización de las condiciones que ocurren en la naturaleza para unas características del sedimento particulares y condiciones estables del oleaje”, posteriormente, Dean (1991) añade una definición como “el balance entre fuerzas constructivas y destructivas”.

Bruun (1954) y posteriormente, Dean (1977), obtuvieron la formulación matemática que define el perfil de Equilibrio en playas, de la forma:

$$h = A \cdot x^{2/3} \quad \text{Ec.1}$$

La variación cíclica del nivel del mar (marea), producen cambios que afectan a la morfodinámica de las playas, y por consiguiente al perfil de equilibrio (Muñoz-Pérez y Medina, 2005).

Masselink y Short (1993), Inman et al. (1993), González (1995) y Bernabeu et al. (2002) desarrollan una formulación del perfil de equilibrio en dos tramos: perfil emergido (perfil de rotura) y perfil sumergido (perfil de asomeramiento), lo que se ha venido llamando como un perfil bipolarabólico. Estos autores no tuvieron en cuenta los efectos causados en el perfil de equilibrio por la existencia de zonas con lajas.

En las zonas costeras donde las lajas rocosas o arrecifes juegan un papel predominante desde el punto de vista de la morfodinámica costera es importante el conocimiento de los perfiles en laja. Muñoz-Pérez (1996) fue el primer investigador que abordó, de forma teórico-práctica (utilizando datos de Gómez-Pina (1995)), un modelo que permitía de manera relativamente sencilla el diseño práctico de playas apoyadas. En los estudios de Muñoz-Pérez et al (1999) se enfatiza principalmente en la relación existente entre el parámetro de forma con laja (A_{CL}) y sin laja (A_{SL}).

$$A_{CL} = 1,48 A_{SL} \quad Ec.2$$

Gómez-Pina (2001) propone un modelo bipolarabólico de perfiles de playa en mares con marea basado en datos de campo del litoral español que permite la cuantificación de una serie de parámetros relacionados con el perfil de playa. También propone un modelo para el tratamiento de lajas mareales. Las formulaciones y recomendaciones propuestas son de aplicación a las fachadas mareales de la costa española. Gómez-Pina, amplió la formulación de Muñoz-Pérez, introduciendo el parámetro de "altura de ola relativa" (H/F_L), ó su término equivalente de "francobordo relativo" (F_L/H), uno de los parámetros clásicos de mayor influencia sobre la transmisión del flujo de energía en los diques impermeables sumergidos (como son las lajas rocosas) en la forma siguiente:

$$A_L^{Medido} = A_{Dean} f \left(\frac{B_L}{F_L}, \frac{H}{F_L} \right) \quad Ec.3$$

Donde B_L es el ancho de laja (m), F_L es el francobordo (m) y H la altura de ola (m).

El perfil de equilibrio se extiende hasta una "profundidad límite" ("seaward limit") o "profundidad de cierre" (closure depth), más allá de la cual no existe transporte significativo de material, y que es la que determina el límite de validez del perfil.

Para perfiles con laja Muñoz Pérez (1996) y Gómez-Pina (2001), han definido los parámetros de forma de la parábola emergida. Dichos parámetros han sido determinados en zonas muy diferentes, lo que nos da una buena aproximación para el conjunto de las playas de las distintas fachadas en función de la tipología de perfil. La diversidad de zonas mareales, condiciones energéticas a las que están sometidas los perfiles de playa y las variaciones sedimentológicas de las distintas fachadas, junto con el bajo número de playas estudiadas por fachadas, hace necesario la cuantificación de los parámetros anteriormente definidos en zonas mucho más delimitadas, de donde además se tengan datos de un mayor número de playas.

El objetivo, por tanto, de este artículo, es la determinación de nuevas formulaciones sobre los parámetros de diseño de la parábola emergida y sumergida (en el caso de que exista) del perfil de equilibrio con lajas, en mares con marea. Estos parámetros pueden ser de aplicación a futuros proyectos de regeneración de playas en el litoral de la Provincia de Cádiz. Estas nuevas formulaciones, han sido aplicadas y modeladas sobre los propios perfiles existentes que han servido de base para la realización de este trabajo, con el fin de cuantifica el error existente entre el perfil real y el modelado.

2 Área de estudio

El área de estudio comprende las playas del litoral de la Provincia de Cádiz. La provincia limita al Norte con las provincias de Sevilla y Huelva, al Este con la provincia de Málaga, al Suroeste con el Océano Atlántico, al Sureste con el Mar Mediterráneo, y al Sur con el Estrecho de Gibraltar y el territorio británico de Gibraltar (Fig. 1)

Las aguas costeras de Cádiz pueden considerarse como una región de transición debido a la confluencia del mar Mediterráneo y del Océano Atlántico. La situación entre dos mares le confiere unas características únicas. Sus costas poseen unas condiciones ambientales diferentes según nos encontremos en la vertiente atlántica o en la mediterránea (HIDTMA, 2013). El Estrecho de Gibraltar se conforma como lugar de intercambio de aguas entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo dando lugar a unas condiciones oceanográficas muy singulares.

Se han analizado un total de 71 playas en el total de los 285 kilómetros de costa del litoral de la Provincia de Cádiz.

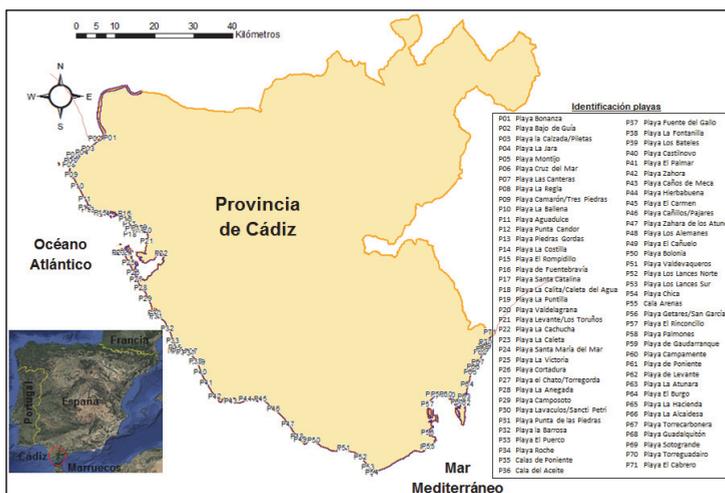


Fig. 1 Localización de la zona de estudio

3 Metodología

Para la realización del presente artículo se comenzó con una revisión del “estado del arte” de los principales aspectos relacionados con este estudio.

Inicialmente, se identificaron las diferentes tipologías de perfil de playa existentes en el litoral de la Provincia de Cádiz (Contreras et al, 2017). Para la definición de las distintas tipologías de perfiles de playa, se ha partido de la propuesta realizada por Gómez-Pina (2001), a las cuales les han sido añadidas dos nuevas tipologías. Entre todas las tipologías existentes, se ha seleccionado y estudiado las apoyadas en laja rocosa.

Una vez definido la tipología del perfil a estudiar, se ha realizado una recopilación de datos de campo para el posterior análisis.

Los datos de la cartografía, batimétricos, sedimentos, morfología y parte de los fotográficos se han obtenido del “Estudio Ecocartográfico de la Provincia de Cádiz” encargado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente a la UTE Ecoatlántico (HIDTMA, 2013). El clima marítimo se ha obtenido a partir del conjunto de datos de la Red Exterior de Boyas, así como de la serie WANA pertenecientes a Puertos del Estado.

Se ha partido de la cartografía incluida en el GIS del estudio Ecocartográfico. Con la herramienta “*Arctoolbox*” de ArcMap se han exportado los datos de las capas de topografía, batimetría, línea cero y línea de localización de los perfiles transversales a un fichero CAD. Una vez obtenido el perfil de la playa, se ha editado en CAD la geometría de dicho perfil, obteniendo los distintos puntos en coordenadas (x,h) que lo definen. El listado de puntos (x,h) se ha integrado en la base de datos. Los datos de sedimentos, a través de las tablas de ArcMap, se han editado y trasladado a la base de datos que se expondrá posteriormente.

A partir de los datos de perfil natural del terreno, seleccionando el número de perfil a través de una “macro” creada en Excel, obtenemos la representación gráfica del perfil de playa. Conocido el perfil transversal natural de playa y conjuntamente con la morfología del terreno, se procedió al modelado del perfil, en función de la tipología de perfiles propuesta.

Se ajustaron los distintos parámetros que definen el perfil hasta encontrar aquellos, que mejor se ajustaban al perfil de real de playa. El mejor ajuste se consiguió visualmente, comparando las gráficas de salida del perfil transversal propuesto y real, y cuantitativamente, haciendo mínimo el error medio cuadrático entre el perfil real y el perfil propuesto.

Los parámetros deducidos que definen el perfil de playa emergido y sumergido, han sido aplicados a los perfiles analizados anteriormente, determinando cuantitativamente el error existente entre los valores determinados y los valores reales del perfil de playa. Dichos parámetros han sido comparados con los expuestos por autores anteriores, de forma que puedan ser comparables los errores entre los diferentes autores. El análisis comparativo de los distintos modelos se ha realizado gráficamente y analíticamente. En la Tabla 1 se resume la formulación de los distintos parámetros de cálculo en función de cada autor.

El análisis comparativo entre los diferentes modelos, solo se aplicarán los parámetros que definan tanto la parábola emergida como la parábola sumergida, ajustándose el resto del perfil (playa seca y derrame) a la geometría real del perfil

de playa. Aunque, conjuntamente con este estudio, se han determinado relaciones que definen tanto la playa seca como el derrame en función del tamaño del sedimento y grado de exposición del perfil (para la playa seca), las condiciones particulares de cada playa por sus condiciones de contorno, hace que estos parámetros puedan variar significativamente, hecho que puede desvirtuar los resultados obtenidos en este trabajo, por lo que no han sido considerados.

Tabla 1. Formulación empleada para los distintos parámetros de diseño en función modelos propuestos por Dean (1977), Muñoz-Pérez (1996), González (1995) y Gómez-Pina (2001)

Parámetro	Gómez (2001)	González (1995)	Muñoz (1996)	Dean (1977)
Origen "O ₁ " parábola emergida	PMVE	PMVE	PMVE	PMVE
Parábola emergida bipabólica	$h = A_e x^{2/3}$	$h = A_e x^{2/3}$	-	$h = A x^{2/3}$
P. de forma emergido "A _e " (m ³)	$A_e = 0,437 D_e$	$A_e = 0,65 D_e^{0,44}$	-	$A = 0,214 D_m^{0,484}$
Parábola emergida monoparabólico	$h = A_L x^{2/3}$	$h = A_e x^{2/3}$	$h = A_L x^{2/3}$	$h = A x^{2/3}$
P. de forma emergido "A _L " (m ³)	$A_L = 1,5 A$	$A_e = 0,65 D_e^{0,44}$	$A_L = 1,46 A$	$A = 0,214 D_m^{0,484}$
Origen "O ₂ " parábola sumerg.	BMVE	BMVE	-	-
Parábola sumergida	$h = A_s x^{2/3}$	$h = A_s x^{2/3}$	-	-
P. de forma sumerg. "A _s " (m ³)	$A_s = 0,441 D_s$	$A_s = 0,55 D_s^{0,44}$	-	-
Distancia entre polos "l ₂ " (m)	$l_2 = 0,910 l_{2e}^{0,87}$	$l_2 = l_{2e}^{0,87}$	-	-

Para el análisis cuantitativo comparativo de los distintos modelos de perfiles de playas estudiados, se ha determinado el error medio cuadrático entre el modelo propuesto y el perfil real. Dado que el error calculado no es adimensional (tiene unidades de metros), con el objetivo de convertirlo en adimensional y comparable con respecto al modelo monoparabólico planteado inicialmente por Dean, se ha determinado la relación entre el error de cada uno de los modelos con respecto al error del modelo de Dean. Este dato, ya adimensional, nos indica las mejoras del modelo planteado, con respecto al que planteo Dean. Por tanto, un error adimensional de 1, nos indica que el modelo no ha mejorado nada con respecto al propuesto por Dean, mientras que un error adimensional de 0, nos indica que el modelo se ajusta perfectamente al perfil real.

Para el análisis cuantitativo de los perfiles se han diferenciado entre aquellos perfiles que visualmente se adaptan mejor o peor al perfil real. De esta forma, en función del grado de adaptación al perfil real de playa, se han clasificado los perfiles en: R; Su adaptación no es buena, SI; Su adaptación al perfil real es buena, MB; Su adaptación al perfil real es muy buena

Los parámetros una vez validados, son de aplicación a futuros proyectos de regeneración de playa en el litoral de la Provincia de Cádiz.

4 Resultados y discusión

Después de analizar las 71 playas existentes en el litoral de la Provincia de Cádiz encontramos la distribución de tipologías mostradas en la Fig. 2. La definición de las diferentes tipologías está basada en la clasificación propuesta por Contreras et al. (2017).

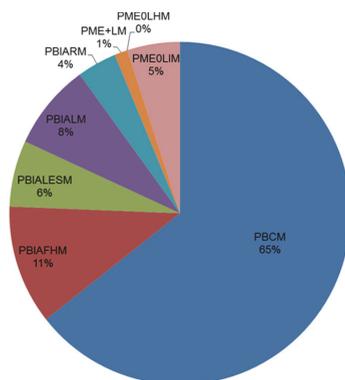


Fig. 2 Distribución de las diferentes tipologías de perfiles de playa en el Litoral de la Provincia de Cádiz siguiendo la clasificación de Contreras et al. (2017), basado en la propuesta inicial de tipología de perfiles de playa propuesto por Gómez-Pina (2001)

Como se puede observar en la Fig. 2 la mayor parte de perfiles existentes son del tipo biparabólico (94%). Por ser los más numerosos, en este artículo se van a definir los parámetros de diseño de los perfiles del tipo biparabólico.

Por tanto, para cada una de las tipologías propuestas, es necesario definir el origen de la parábola emergida y sumergida, relación entre el tamaño del sedimento y tipología del perfil, parámetro de forma emergido y sumergido, parámetro de ajuste “I₂”, diámetro medio característico D₅₀ de las muestras emergidas y sumergidas, pendiente de la berma, pendiente de la laja emergida, pendiente de la laja sumergida, longitud de laja emergida y sumergida, profundidad de cierre, ancho de laja y francobordo.

A modo de ejemplo en la siguiente figura se representan los parámetros de diseño del perfil biparabólico incompleto apoyado en laja emergida sobre marea (PBIALESM).

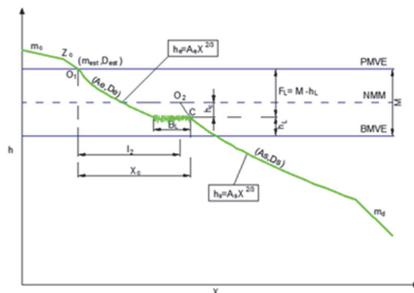


Fig. 3 Esquema de parámetros del perfil de equilibrio biparabólico apoyado en laja en mares con marea

4.1 Origen (O₁) de la parábola emergida

Para identificar el origen de la parábola emergida del perfil, se define el coeficiente del origen de la parábola emergida (CO₁). Dicho coeficiente se define como la relación entre, la cota del origen de la parábola emergida (O_{1y}) y el valor de la PMVE de cada uno de los perfiles estudiados. Si el coeficiente (CO₁) tiene un valor de “1”, el origen de la parábola emergida (O₁) coincide con la PMVE. Si su valor es “0”, el origen de la parábola emergida se sitúa en la BMVE. Si el coeficiente es mayor que “1”, el origen (O₁) se encuentra por encima de la PMVE.

Existen perfiles en los que por el escalón de playa pueden resultar confuso la identificación de origen O₁ de la parábola emergida. Este hecho es fundamental a la hora de definir los distintos parámetros de diseño del perfil de playa (fundamentalmente A_c). Un mismo diámetro del sedimento del perfil emergido podríamos considerar dos parámetros diferentes del coeficiente de forma A_c que pueden llegar a variar entre sí un 50% y que desvirtúan la relación con el D₅₀ del perfil emergido. Es por ello, por lo que, aunque los perfiles han sido ajustados para la obtención del menor error posible (es decir, mejor ajuste posible), a la hora de relacionar los parámetros característicos de cada uno de los parámetros de diseño que lo requieran, y con el objeto de no desvirtuar los resultados, se han descartado aquellos perfiles en los que el origen de la parábola emergida se aleje de la PMVE con un error de ±10%.

En la Fig. 4 (A) se muestra los coeficiente del origen de la parábola emergida (CO₁), donde como se puede observar, la mayor parte de los perfiles tienen el origen de la parábola emergida en la PMVE.

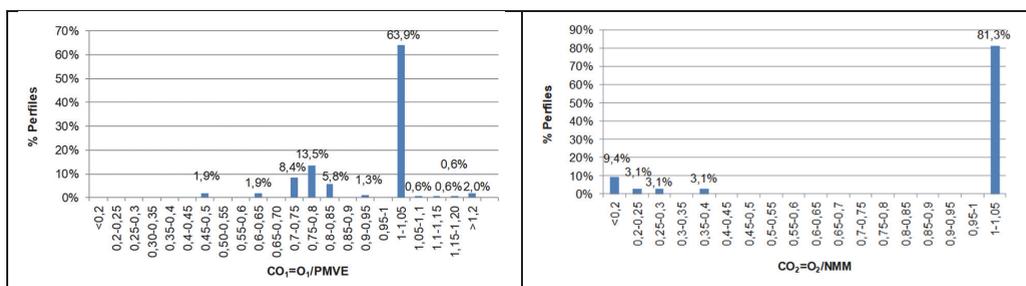


Fig. 4 Coeficiente (CO₁) del origen (O₁) de la parábola emergida con respecto a la PMVE (A). Coeficiente (CO₂) del origen (O₂) de la parábola sumergida con respecto al NMM en perfiles de tipo biparabólico con laja (B)

Destacar que nuestra hipótesis de partida (origen de la parábola emergida en la PMVE) coincide con la teoría definida por distintos autores anteriores (Gómez-Pina, 2001; Bernabéu, 1999).

4.2 Origen (O₂) de la parábola sumergida

Tras una primera revisión sobre la totalidad de los perfiles estudiados, se observa que el origen de la parábola sumergida del perfil biparabólico, se encuentra en torno al Nivel Medio del Mar. Para identificar el origen de la parábola sumergida, se define el coeficiente del origen de la parábola sumergida (CO₂), como la relación entre la cota del origen de la parábola

sumergida (O_{2s}) y la cota del nivel medio del mar (NMM). Un coeficiente del origen de la parábola sumergida (CO_2) de "1", representa que el origen de la parábola sumergida se encuentra en el nivel medio del mar, así como si el valor es de "0", representa que el origen de la parábola sumergida se encuentra en la BMVE.

Haciendo el análisis conjunto del total de perfiles (Fig. 4 (B)), el 92,9% de los perfiles tienen el origen de la parábola sumergida en torno a la cota del NMM. En el resto de perfiles, el origen se encuentra disperso entre coeficientes CO_2 que oscilan entre 0,00 y 0,38.

Los datos anteriores nos permiten ubicar como norma general el origen de la parábola sumergida en el NMM. Destacar que Gómez-Pina (2001) después de estudiar un total de seis playas en el litoral de la Provincia de Cádiz, definía el origen de la parábola sumergida para la costa de la provincia de Cádiz, en el nivel de la BMVE.

4.3 Relación entre el tamaño del sedimento y la tipología de perfil

El D_{50} medio de las muestras emergida, sumergida, y la media total de las dos muestras en los perfiles analizados clasificado por tipologías se representan en la Fig. 5. El número de perfiles analizados por tipología es: 14 en el PBIAFHM, 8 en el PBIALESM, 5 en el PBIALM y 2 para el PBIARM.

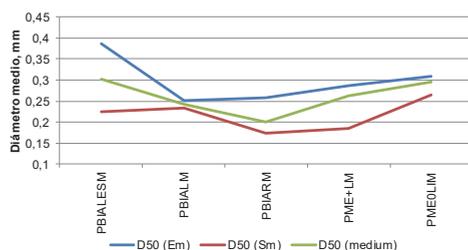


Fig. 5 Diámetro medio emergido (Em), sumergido (Sm) y medio según tipología de perfil de playa

Como se puede observar en la Fig. 5 las muestras sumergidas tienen una mayor proporción de finos que las muestras emergidas.

4.4 Relación entre el tamaño del sedimento y el parámetro de forma "A"

Las expresiones obtenidas de $A_{e,s,c} = f(D_{e,s,c}^{50})$ son fundamentales para definir correctamente el perfil de aportación (los subíndices e, s, c, son los referidos a los diámetros emergidos, sumergidos y compuestos) y poder, entre otras cosas, cuantificar el volumen de aportación en un proyecto de regeneración de playas. Aunque realmente estamos interesados en las relaciones A-D para las partes emergidas y sumergidas en el perfil bipolarbólico, también se han obtenido relaciones para el llamado "perfil compuesto" (de tipo monoparabólico, de peor ajuste en general que el bipolarbólico), con la finalidad de comparar la ecuación de Dean para la costa del litoral de la Provincia de Cádiz (aun admitiendo su peor ajuste comparativo).

Tal y como se explicó anteriormente, y con el objetivo de unificar criterios a la hora de identificar el valor de parámetro "A", para estudiar la relación existente entre el tamaño del sedimento y el parámetro de forma "A", se han identificado aquellos perfiles en los que el origen de la parábola emergida se encuentra en torno al 10% de desviación con respecto a la relación de origen de la parábola emergida y la PMVE.

Se han identificado los perfiles por el grado de exposición energética al que está sometidos. Para ello, se ha considerado como playas no expuestas aquellas que se encuentran protegidas bien por obras de defensa construidas artificialmente (espigones), abrigos naturales (aquellas playas dentro de la Bahía de Cádiz y la Bahía de Algeciras), o incluso perfiles con laja (a poca profundidad) que disminuyen el grado de exposición. El resto de playas han sido consideradas como playas expuestas.

En las gráficas posteriores, las relaciones "D-A" obtenidas han sido comparadas con el valor teórico del parámetro de forma "A" de Dean con respecto al diámetro "D".

Las líneas de tendencia representativas de la relación "D-A" se han ajustado a una función parabólica, al igual que hizo Dean.

4.4.1 Parámetro de forma emergido "Ae"

4.4.1.1 Perfiles bipolarbólicos

Una vez analizada las diferentes tipologías para los dos grados de exposición consideradas (expuestas y no expuestas), en el gráfico de la Fig. 6 se representa un análisis comparativo de los mismos. Para los perfiles con laja son del tipo no expuestos.

En el caso de los **perfiles del tipo PBIALESM** (perfil biparabólico incompleto apoyado en laja emergida sobre mare) el parámetro de forma emergido es inferior, a igualdad de diámetro de sedimento, a las tipologías PBIAFHM, PBIALM, PBIARM. Esto puede ser debido a que en el primer caso (PBIALESM), en los que los grandes temporales sobrepasan la laja situada entre la parábola emergida y sumergida, erosionando el perfil emergido y perdiendo parte del sedimento en el perfil sumergido, que posteriormente en la época estival no consigue ascender al perfil emergido por el efecto barrera de la laja existente, resultando, por tanto, un perfil emergido más tendido con menor pendiente.

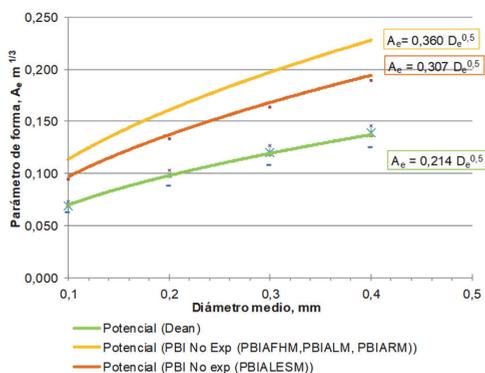


Fig. 6 Análisis comparativo de la relación entre el diámetro medio emergido respecto al parámetro de forma emergido “ A_e ” en playas expuestas y no expuestas con diferentes tipologías

4.4.1.2 Perfiles monoparabólicos

En los perfiles monoparabólico, la forma de disipar la energía es diferente a los perfiles biparabólico. Como consecuencia de ello, el parámetro de forma A serán distintos (normalmente superiores al relativo sin laja), dependiendo básicamente de otros factores como el ancho de laja (B_L) y el francobordo (F_L).

Se ha analizado la relación entre el diámetro de la arena del perfil emergido y el parámetro de forma “ A ” medido. Como en los casos anteriores, con el objeto de no desvirtuar el parámetro de forma “ A ”, se han analizado aquellos perfiles en los que el origen de la parábola emergida se encuentra a una distancia no superior a $\pm 10\%$ de la PMVE.

En estos casos de tipología (PM y PBIALESM) la presencia de la laja (por encima de la BMVE o a poca profundidad por debajo de la BMVE) hace que todos estos perfiles sean considerados como no expuestos.

En total se han analizado 9 perfiles, de los cuales 4 se corresponden con perfiles biparabólico incompleto en laja emergida en mares con **marea (PBIALESM)**, 2 casos se corresponden con perfiles monoparabólico emergido con laja semisumergida con marea (PME+LM) y por último 3 perfiles monoparabólico emergido con laja sumergida inclinada a la BMVE con marea (PMEOLIM). Para el estudio de los perfiles monoparabólicos se han considerado los datos de los perfiles biparabólico incompletos apoyado en laja emergida en mares con marea (PBIALESM), ya que en su parte emergida se pueden asimilar a perfiles monoparabólicos.

En la Fig. 7 se representa la relación entre diámetro D_{50} del sedimento emergido con respecto al parámetro de forma medido A_L .

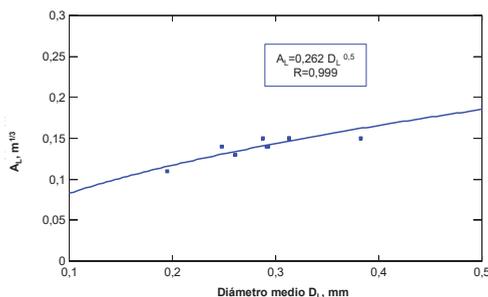


Fig. 7 Relación entre el diámetro del sedimento en perfiles con laja y el parámetro de forma de laja (A_L) en perfiles monoparabólico (PM) y perfiles biparabólico incompletos apoyado en laja emergida en mares con marea (PBIALESM)

Como se ha comentado anteriormente, el parámetro de forma A_L , depende del ancho de laja “ B_L ” y del francobordo “ F_L ”. Si analizamos individualmente estos parámetros (B_L y F_L) con respecto al parámetro de forma A_L , observamos en las Fig. 8 (Cuadro A y B), que no hay una correlación entre parámetros.

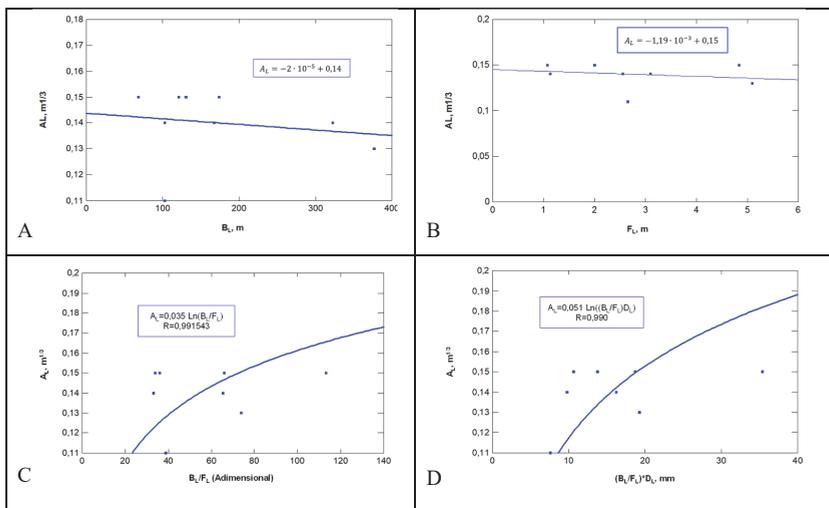


Fig. 8 Relación entre el parámetro de forma de laja (A_L) y ancho de laja “ B_L ” (Cuadro A), francobordo “ F_L ” (Cuadro B), relación entre el cociente del ancho de laja y el francobordo (B_L/F_L) (Cuadro C) y relación entre el producto del diámetro del sedimento emergido por el cociente del ancho de laja y el francobordo “ $(B_L/F_L)*D_L$ ” (Cuadro D) en perfiles monoparábólico (PM) y perfiles biparábólico incompletos apoyado en laja emergida en mares con marea (PBIALESM)

Siguiendo los resultados obtenidos por Muñoz-Pérez (1999), en donde se analizaba la relación entre el parámetro de forma medido (A_L) y el cociente entre el ancho de laja y el francobordo (B_L/F_L) (Fig. 8, cuadro C; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) así como la relación del parámetro de forma (A_L) con el producto del diámetro del sedimento emergido por el cociente del ancho de laja y el francobordo “ $(B_L/F_L)*D_L$ ” (Fig. 8, cuadro D; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Se han determinado las relaciones individuales entre las expresiones obtenidas con la formulación clásica de Dean (1977) y de Muñoz-Pérez (1996), con respecto a los datos medidos del parámetro A_L , detectándose un mejor ajuste en los resultados de Muñoz-Pérez que en los de Dean.

$$A_L = 1,205A_{Dean} \quad 4.1$$

$$A_L = 0,828A_{L,Muñoz} \quad 4.2$$

Por otro lado, Gómez-Pina (2001) determina el valor del parámetro de forma de laja con una relación con respecto al propuesto por Dean y Muñoz-Pérez. Con respecto a Dean, los valores de Gómez-Pina son del orden del 50% más elevados que los de Dean ($A_{L, Gómez}/A_{Dean}=1,5$), mientras que con respecto a Muñoz-Pérez este si se ajustan bastante bien ($A_{L, Gómez}/A_{L, Muñoz}=1,03$). No obstante, esta relación varía del orden de 0,7-1,4.

Es decir, que el parámetro de forma de laja emergido tiene mayor pendiente que el propuesto por Dean, mientras que con respecto al propuesto por Muñoz-Pérez (1996) y Gómez-Pina (2001) (es muy parecido al de Muñoz-Pérez) es menor.

Con el fin de homogeneizar las distintas fachadas mareales del litoral español, G. Gómez (Gómez-Pina, 2001) introdujo la necesidad de:

- Normalizar el parámetro medido “ A_L ” con respecto al de Dean “ A_{Dean} ”, tratándolo de la forma A_L/A_{Dean} . De esta forma se disminuye el efecto del D_{50} , mejorando el ajuste y la tendencia de los datos.
- Introducir el efecto de la altura de ola a pie de laja “ H ”, en la forma adimensional de altura de ola relativa con respecto al francobordo (H/F_L), además del parámetro de Muñoz-Pérez, de ancho de laja relativo (B_L/F_L).

En la Fig. 9 se muestra la relación obtenida (línea azul), haciendo un análisis comparativo con los resultados obtenidos por Muñoz-Pérez (línea roja) y Gómez-Pina (línea verde), para la fachada del litoral gaditano (la relación entre la altura de ola a pie de laja y el francobordo (H/F_L) es muy parecida a lo largo de todo el litoral de Cádiz).

Como se puede observar, existe bastante similitud en los datos analizados con respecto a los propuestos por Gómez-Pina.

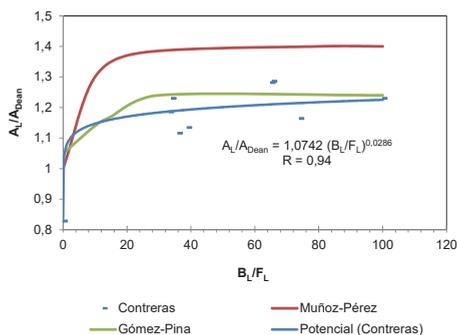


Fig. 9 Relación entre el parámetro adimensional (B_L/F_L) y el parámetro de forma de laja adimensional (A_L/A_{Dean}) en perfiles monoparabólico (PM) y perfiles biparabólico incompleto apoyado en laja emergida en mares con marea (PBIALESM)

Por tanto, para anchos de laja relativos comprendidos entre 30 y 100, la relación entre el parámetro de forma de laja con respecto a la Dean es de 1,20, todo ello, para altura de olas relativas (H/F_L) comprendidas entre 0,72 y 3,78.

4.4.2 Parámetro de forma sumergido “As”

El parámetro de forma sumergido (A_s) presenta menos diferencias que el parámetro de forma emergido para las diferentes tipologías (ver Fig. 10 y **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Cabe destacar que prácticamente en todos los casos, salvo en el PBIALESM que es casi semejante, la curva con la relación $d-A_s$, se encuentra por encima del definido por Dean, lo que significa que la parábola emergida presenta un perfil más vertical.

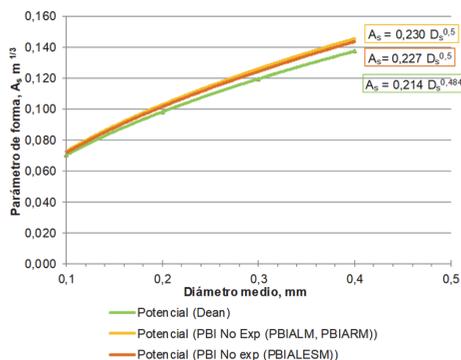


Fig. 10 Análisis comparativo de la relación entre el diámetro medio sumergido respecto al parámetro de forma emergido “As” en playas expuestas y no expuestas con diferentes tipologías

4.5 Parámetro de ajuste “I2”

El parámetro I_2 indica la distancia entre los polos de la parábola emergida y sumergida. El parámetro I_2 , lo definió inicialmente González (1995), y que posteriormente Gómez-Pina, (1995) lo validó, no proporcionando buenos resultados (el parámetro I_2). Fue Bernabéu (1999) quien posteriormente planteó la nueva formulación teórica del parámetro I_2 . Sobre esta formulación teoría, se han proporcionado factores de corrección “C” del parámetro I_2 , en función de las distintas fachadas mareales (Gómez-Pina, 2001).

$$I_2 = I_{2T}^B * C^{Fachada} \tag{4}$$

Como se ha comentado en el punto 4.1 con el objeto de no desvirtuar los valores del parámetro I_2 , se han teniendo en cuenta exclusivamente aquellos perfiles en los que el origen de la parábola emergida, se encuentre en torno a un $\pm 10\%$ respecto a la PMVE.

Entre los perfiles biparabólico incompleto con laja, se han analizado los PBIALM (perfil biparabólico incompleto apoyado en laja con marea) y los PBIARM (perfil biparabólico incompleto apoyado en fondo rocoso irregular con marea), no considerándose los PBIALESM (perfil biparabólico incompleto apoyado en laja emergida sobre marea) ya que la laja existente entre la primera y segunda parábola desvirtúan el valor del parámetro I_2 . Todas estas tipologías han sido analizadas como playas no expuestas. El coeficiente “C” de corrección con respecto al parámetro I_{2T}^B (I_2 teórico planteado por Bernabéu (1999)) es de 0,965.

4.6 Aplicación de los parámetros de diseño sobre los perfiles reales

Una vez deducidos los parámetros de diseño del perfil de playa en función de la tipología del perfil, el tamaño del sedimento y el grado de exposición del perfil, se han validado dichos parámetros con la aplicación de estos, sobre los perfiles reales.

Se han descartado aquellos perfiles en los que faltaban los datos del sedimento emergido y/o sumergido, perfiles que se encuentran condicionados por obras en el litoral (espigones, canales de acceso, diques de abrigo, ...) y perfiles afectados por la modificación de la batimetría al encontrarse en las proximidades de desembocaduras de ríos.

Han sido modelados un total de 16 perfiles, obteniendo resultados de ajustes bastante aceptables.

4.7 Análisis comparativo con otros autores, aplicado a los perfiles reales

Una vez realizada la aplicación práctica de los parámetros deducidos en este trabajo se ha completado el estudio con un análisis comparativo entre las distintas teorías expuestas anteriormente por diferentes autores.

El análisis comparativo se ha realizado con respecto a las teorías propuesta por Dean (1977), Muñoz-Pérez (1996), González (1995) y Gómez-Pina (2001), determinándose el error medio cuadrático adimensional por cada uno de los autores y tipologías.

Tabla 2. Error medio cuadrático (adimensional) en para cada uno de los autores estudiados para los perfiles de tipo biparabólico (PB). Se indica el número de perfiles estudiados (n° de perfiles), el grado de adaptación al perfil real (R, SI, MB) así como se remarcan el error relativo inferior de cada caso

Tipología	Adaptación	Nº perfiles	Contreras	Gómez-Pina	González	Muñoz-Pérez
PBIALESM	R-MB	2	0,23	1,56	2,58	-
	MB	1	0,01	0,14	0,28	0,02 (1)
PBIALM	R-MB	2	0,49	0,96	0,32	-
	MB	1	0,09	0,22	0,42	-
PBIARM	SI	1	0,25	0,67	0,16	-
PME+LM	SI	1	0,01	0,01	0,01	0,01
PMEOLIM	SI-MB	6	0,28	0,85	0,32	0,55
	MB	2	0,01	0,02	0,01	0,02

Como se puede observar, prácticamente en casi todos los casos, el modelo que mejor se ajusta al perfil real es el propuesto en el presente artículo.

Haciendo un balance general de todos los modelos, podemos comentar que todos mejoran considerablemente el presentado inicialmente por Dean. De entre ellos, los modelos de Gómez-Pina (2001) y González (1995) presentan resultados muy similares y de peor ajuste que los aquí propuestos.

A continuación, se muestra un ejemplo gráfico comparativo de cada uno de los modelos para las tipologías estudiadas. Para dicho ejemplo comparativo se han utilizado los mismos perfiles descritos anteriormente en la aplicación del modelo del presente trabajo.

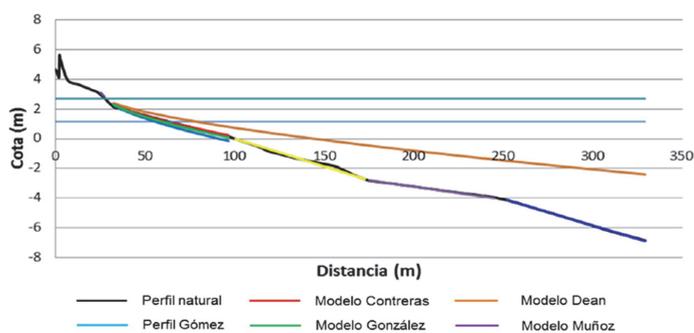


Fig. 11 Modelado perfil monoparabólico emergido a la BMVE con laja inclinada con marea (PMEOLIM). Playa Caños de Meca/Faro de Trafalgar

5 Conclusiones

El litoral de la provincia de Cádiz dispone de una amplia variedad de tipología de perfiles provocado por la existencia de zonas con lajas/rocas que interrumpe el desarrollo normal del perfil típico biparabólico en mares con marea. La situación de la zona lajosa existente en el perfil condiciona la tipología de perfil.

Para la cuantificación de los parámetros de diseño de los perfiles de playa, dado, que las condiciones energéticas en todo el litoral de la provincia de Cádiz son muy similares, hay que diferenciar los perfiles en función de su grado de exposición.

La parte emergida del perfil (biparabólico y monoparabólico) tiene su origen en “O₁”, desarrollándose hasta el punto de cambio de curvatura “c” situado entre la parábola emergida y sumergida o laja. El origen “O₁” se sitúa en la PMVE. La forma de la parábola es del tipo Dean, $h_e = A_e x^{2/3}$, donde A_e es el parámetro de forma emergido relacionado directamente con el diámetro del sedimento $A_e = f(D_e)$.

La parte sumergida del perfil (biparabólico), es del tipo (Dean) parabólico $h_s = A_s x^{2/3}$, donde A_s es el parámetro de forma sumergido relacionado directamente con el diámetro del sedimento $A_s = f(D_s)$. El polo “O₂” de la parábola sumergida se encuentre situado en el nivel medio del mar, y a una distancia con respecto al polo “O₁” de la parábola emergida, de valor I_2 . Para los perfiles biparabólicos donde la laja está situada entre la primera y segunda parábola, el polo “O₂”, está condicionado por la cota de la laja intermedia. La intersección entre la parábola emergida o la zona con laja y la parábola sumergida se identifica con el punto “c” de cambio de curvatura. El perfil sumergido se desarrolla por lo tanto desde el punto “c” hasta la profundidad de cierre “h*” o hasta alcanza una zona con laja en los perfiles biparabólicos.

Los parámetros de forma emergidos y sumergidos para las diferentes tipologías se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 3. Parámetros de forma emergido y sumergido para las tipologías de perfil de playa Perfil Biparabólico incompleto apoyado en laja (PBIALM), Perfil Biparabólico incompleto apoyado en fondo rocoso (PBIARM), Perfil Biparabólico incompleto apoyado en laja emergida sobre marea (PBIALESM) y perfil monoparabólico

Tipología de perfil	Parámetro de forma emergido “A _e ” $A_e = f(D_e)$	Parámetro de forma sumergido “A _s ” $A_s = f(D_s)$
PBIALM, PBIARM	$A_e = 0,360 D_e^{0.5}$	$A_s = 0,230 D_s^{0.5}$
PBIALESM	$A_e = 0,307 D_e^{0.5}$	$A_s = 0,227 D_s^{0.5}$
PM	$A_L = 0,262 D_L^{0.5}$	-

El parámetro I_2 , distancia entre los polos de la parábola emergida y sumergida, se recomienda la utilización de las formulas teóricas de Bernabéu (1999) (I_{2T}^0) modificadas por el coeficiente de corrección “C”, que varía en función del grado de exposición al que está sometido el perfil de playa, tomando un valor de 0,965.

La aplicación de los parámetros de diseño de perfiles de playas propuestos en este artículo se adaptan de una forma bastante aceptable a los perfiles reales existentes. Si comparamos los parámetros de diseño propuestos por otros autores (Dean (1977), González (1995) y Gómez-Pina (2001)) y lo aplicamos a los perfiles reales, salvo en algún caso esporádico, el modelo presentado en este estudio, mejora considerablemente las propuestas de los autores anteriormente presentado.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Demarcación de Costas de Andalucía Atlántico su colaboración en la aportación de datos para la confección del presente artículo.

Referencias

- Bernabeu-Tello, A., Muñoz-Pérez, J., & Medina-Santamaria, R. (2002). Influence of a rocky platform in the profile morphology: Victoria Beach, Cadiz (Spain). *Ciencias Marinas*, 28(2), 181–192.
- Bernabéu, A. (1999a). *Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.
- Bernabéu, A. (1999b). *Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas*. Universidad de Cantabria.
- Bruun, P. (1954). *Coast Stability. Volúmenes 1-7*. University of Minnesota.
- Bruun, P. (1981). Definición del perfil de equilibrio. *Coastal Geomorphology vs Post Engineering*.
- Contreras, A., Gómez-Pina, G., Muñoz-Pérez, J., & Chamorro, G. (2017). Tipologías de perfiles de playa en el litoral de la Provincia de Cádiz. In U. P. de València (Ed.), *XIV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. Alicante (pp. 71–82).
- Dean, R. G. (1977). *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coast*. Newark, DE, USA.
- Dean, R. G. (1983). Models of beach profile response. In P. Komar and J. Moore (Editors) (Ed.) (pp. 151-165). CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Raton.

- Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53–84. <https://doi.org/10.2307/4297805>
- Fenneman, N. M. (1902). Development of the Profile of Equilibrium of the Subaqueous Shore Terrace. *The Journal of Geology*, 10(1), 1–32. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/30055541>
- Gómez-Pina, G. (1995). *Análisis de perfiles de playa en las fachadas Cantábricas y Atlántica de la costa Española y su aplicación a proyectos de regeneración. Tesis de Magister Ingeniería del Litoral. Universidad de Cantabria.*
- Gómez-Pina, G. (2001). *Modelo biparabólico de cuantificación de perfiles de playa en mares con marea basado en datos de campo del litoral español. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.*
- González, E. M. (1995). *Morfología de playas en equilibrio, planta y perfil. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria.*
- Hidma S.L. (2013). UTE Ecoatlántico. Estudio ecocartográfico del litoral de la provincia de Cádiz. Referencia 28-4983.
- Inman, D. L., Elwany, M., & Jenkin, S. (1993). Shorerise and Bar-berm Profiles on Ocean Beaches. *Journal of Geophysical Research*, 98(C10), 18181–18199.
- Johnson, D. W. (1919). *Shore Processes and Shoreline Development*. Columbia Univ. Press, New York (Hafner Facsimile ed., 1952.).
- Kriebel, D. L., Kraus, N. C., & Larson, M. (1991). Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response. *Proc. Coastal Sediments '91 ASCE*, 557–571.
- Larson, M. (1991). Equilibrium Profile of a Beach with varying Grain Size. *Proc. Coastal Sediments '91 ASCE*, 905–919.
- Larson, M., & Kraus, N. C. (1989). *SBEACH: Numerical Model to Simulate Storm-Induced Beach Change*.
- Masselink, G., & Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9,3, 785–800.
- Moore, B. (1982). *Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Height*. University of Delaware.
- Muñoz-Pérez, J. J. (1996). *Análisis de la morfología y variedad de playas apoyadas en lajas rocosas. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz.*
- Muñoz-Pérez, J. J., Tejedor, L., & Medina, R. (1999). Equilibrium beach profile model for reef-protected beach. *Journal of Coastal Research*.
- Muñoz-Pérez, J., & Medina, R. (2005). Short-term variability on reef protected beach profiles: An analysis using EOF. *Coastal Dynamics 2005: State of the Practice ASCE ISBN: 978-0-7844-0855-1*.
- Pilkey, O. ., Young, S. R., Riggs, S. R., Smith, W. S., & Wu y W. D. (1993). The Concept os Shore Face Profile of Equilibrium: A Critical Review. *Journal of Coastal Research*, 9(1).
- Schwartz, M. L. (1982). *The Encyclopaedia of Beach and Coastal Environments*. Stroudsburg: Hutchinson.

ANEXO 1

LISTAS DE SÍMBOLOS

- A_e ; Parámetro de forma emergido (m^3)
 A_s ; Parámetro de forma sumergido (m^3)
 A_{Dean} ; Parámetro de forma de Dean (m^3)
 $A_{compuesto}$; Parámetro de forma compuesto (m^3)
 C ; Coordenada en el eje "x" de cambio de la parábola emergida a la parábola sumergida (m)
 C_v ; Coeficiente de variación
- D_{50} ; Diámetro característico " D_{50} "
 $D_{50}(E_m)$; Diámetro medio característico D_{50} de las muestras emergidas (mm)
 $D_{50}(S_m)$; Diámetro medio característico D_{50} de las muestras sumergidas (mm)
 D_{medio} ; Diámetro medio característico D_{50} de las muestras emergidas y sumergidas (mm)
- h_{Local} ; Cota de terreno referenciado al Nivel Medio del Mar de Alicante
 $H_{s,12}$; Altura de ola significativa excedida 12 horas al año (m)
 $H_o/(wT)$; Parámetro adimensional de caída del grano
 hc ; Profundidad del cambio de curvatura entre la parábola emergida y la parábola sumergida (m)
 h^* (Teórica) ; Profundidad de cierre teórica s/Birkermeier.(m)
 I_2 ; Distancia entre el origen de la parábola emergida y la parábola sumergida (en la coordenada "x") (m)
 I_{2T}^B ; Parámetro teórico I_2 de A. Bernabéu (m)
- M ; Valor de la PMVE (m)
NMM; Nivel Medio del Mar (m)
 O_{1x} ; Coordenada en el eje "x" del origen de la parábola emergida (m)
 O_{1y} ; Coordenada en el eje "y" del origen de la parábola emergida (m)
 O_{2x} ; Coordenada en el eje "x" del origen de la parábola sumergida (m)
 O_{2y} ; Coordenada en el eje "y" del origen de la parábola sumergida (m)
 O_{1y} -PMVE ; Diferencia de altura entre el origen de la parábola emergida (coordenada "y") y la PMVE (m)
 O_{2y} -NMM ; Diferencia de altura entre el origen de la parábola sumergida (coordenada "y") y el NMM (m)
% O_{1y} /PMVE ; Relación entre el origen de la parábola emergida (coordenada "y") y la PMVE (%)
% O_{2y} /NMM ; Relación entre el origen de la parábola sumergida (coordenada "y") y el NMM (%)
- PMVE; Pleamar Media Viva Equinocial (m)
PMVE- O_{1y} ; Diferencia entre la cota de la PMVE y el origen en la coordenada del eje "y" de la parábola emergida (m)
PBCM: Biparabólico Completo con Marea
PBIAFHM: Biparabólico incompleto Apoyado en fondo horizontal con Marea
PBIALESM: Biparabólico Incompleto Apoyado Laja Emergida Sobre con Marea
PBIALM: Biparabólico incompleto Apoyado en laja Sumergida con Marea
PBIARM: Biparabólico Incompleto Apoyado en Fondo Rocoso Irregular con Marea
- T (s); Periodo del oleaje asociado a $H_{s,12}$ (m)
- X ; Coordenada "x" de un punto determinado del terreno perteneciente al perfil transversal
 X_c ; Distancia en la coordenada "x" entre el origen de la parábola emergida y el cambio de curvatura entre la parábola emergida y sumergida