



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**PERFIL DE EQUILIBRIO Y PROCESOS DE
ACRECIÓN EN PLAYAS CON MAREA:
RECUPERACIÓN NATURAL Y ASISTIDA
MEDIANTE PERFILADO MECÁNICO**

Trabajo realizado por:

Mónica Liliana Pedraza Buitrago

Dirigido:

Ernesto mauricio González Rodríguez

Erica Pellón De Pablo

Titulación:

**Máster Universitario en
Costas y Puertos**

Santander, septiembre de 2021

TRABAJO FINAL DE MASTER

Para mi madre.

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco a mi tutora Erica Pellón de Pablo por su paciencia, ayuda, apoyo y esfuerzo en guiarme para sacar adelante el presente trabajo; también agradezco a mi otro tutor, Mauricio González Rodríguez, por orientarme, no solo con el trabajo final de Master, sino durante todo el curso y darme la oportunidad y confianza para participar en este proyecto.

Le agradezco a mi madre, padre, Simón y Carolina Jiménez, por siempre ser mi apoyo desde donde quiera que esté, y darme la fortaleza para no rendirme.

Le agradezco a Marcela Hernández, a Ana María Estrada, a Lisa Jagau y a Simón Yepes por confiar en mí, porque desde la distancia siempre me dieron una voz de aliento y estuvieron dispuestos a mostrarme este proceso desde el lado más ameno. También le agradezco al resto de mis amigos por el ánimo para finalizar con éxito este reto.

Le agradezco a todo el profesorado del Máster, personal de la Universidad de Cantabria e Instituto de Hidráulica Ambiental por todas las enseñanzas, no solo desde el ámbito académico, sino personal, por mostrarme que no hay fronteras en el conocimiento para ningún área de estudio.

Le agradezco el apoyo al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España bajo la subvención BIA2017-89491-R, Proyecto Beach-Art y al Gobierno de Cantabria a través del Programa Fénix para el desarrollo de los ensayos de laboratorio.

Le agradezco la participación en el proyecto Beach-Art a la Demarcación de Costas de Andalucía Atlántica por llevar a cabo las campañas de campo en las playas de Cádiz.

Le agradezco a la Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (FIHAC) por la cesión de las instalaciones experimentales para el desarrollo de los ensayos contemplados en el presente proyecto.

Le agradezco a todo el personal del laboratorio durante los ensayos de modelado físico por la asistencia técnica recibida.

Perfil de equilibrio y procesos de acreción en playas con marea: Recuperación natural y asistida mediante perfilado mecánico.

Autor: Mónica Liliana Pedraza Buitrago
Directores: Ernesto Mauricio González Rodríguez
Erica Pellón De Pablo
Convocatoria: Septiembre de 2021

Resumen

El ancho de la playa juega un papel fundamental en el nivel de protección frente a temporales que ofrecen las playas a asentamientos y comunidades costeras. En invierno, hay erosión en la berma emergida de la playa haciendo que la línea de costa retroceda y en verano, ante condiciones de calma, las playas tienden a recuperarse, sin embargo, los procesos de acreción son normalmente más lentos que los procesos erosivos, por lo que es habitual que la playa no se recupere completamente antes del verano. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente documento es estudiar el comportamiento del perfil de playa bajo condiciones de acreción en playas con marea en condiciones naturales y con reperfilado mecánico, validando si ante el uso de técnicas de recuperación asistida se consigue una recuperación eficiente y más rápida de la playa que de manera natural.

En torno a dos líneas de aproximación se ha llevado a cabo un estudio basado en ensayos de laboratorio con fondo móvil y mediciones en campo, donde se implementa y se simula el scraping, de esta forma se valida la efectividad de la técnica y se estudia la evolución del perfil, dando como resultado que el scraping es un método apto no solo para la recuperación de la playa, sino como forma de mitigación de impactos ante la presencia de temporales.

Palabra(s) clave

Perfil de equilibrio, scraping, mareas, experimentos en laboratorio.

Equilibrium profile and accretion process on tidal beaches: Natural recovery vs assisted by mechanical profiling

Author: Mónica Liliana Pedraza Buitrago
Directors: Ernesto Mauricio González Rodríguez
Erica Pellón De Pablo
Call: September de 2021

Abstract

Beach width plays a fundamental role in the degree of protection offered to coastal settlements and communities from storms. Winter triggers erosion of the subaerial beach causing shoreline recession, while in summer, under calm conditions, beaches tend to recover. Nevertheless, accretion processes are naturally slower than erosion processes, hence it is common that the beach does not fully recover before summer. Considering the above, the aim of this paper is to study the behavior of the beach profile under accretion environment on tidal beaches using both natural conditions and mechanical re-profiling, validating whether the use of assisted recovery techniques leads to a more efficient and faster accretion processes than in a natural way. The research has been done in-situ and laboratory.

The research has been done in-situ and laboratory, scraping is implemented and simulated, thus validating the effectiveness of the technique, and studying the evolution of the profile, obtaining as a result that scraping is an appropriate method not only for beach recovery, but also to mitigate the impacts caused by storms.

Key word(s)

Equilibrium profile, scraping, tides, laboratory experiments.

Contenido

1. Introducción	10
1.1. Planteamiento del problema.....	10
1.2. Objetivos	12
2. Marco conceptual	13
2.1. Perfil de equilibrio.....	13
2.2. Scraping en playas.....	17
2.3. Técnicas de laboratorio	19
3. Metodología	22
3.1. Campaña de campo	22
3.2. Ensayos de laboratorio.....	26
3.2.1. Escalas	28
3.2.2. Instrumentación y diseño	28
4. Resultados y análisis	31
4.1. Campañas de campo	31
4.2. Ensayos de laboratorio.....	43
5. Conclusiones	56
6. Bibliografía.....	58

Índice de Figuras

Figura 2. Relación entre el parámetro A y el tamaño de grano propuesta por Moore (1982) y modificada por Dean.	15
Figura 3. Modelo morfológico de evolución estacional del perfil de playa. pm y bm hacen referencia a la pleamar y la bajamar, respectivamente. La zona sombreada La zona sombreada comprende el perfil hasta el límite exterior del perfil de asomeramiento. Las escalas vertical y horizontal se conservan en todos los gráficos presentados en el modelo	16
Figura 4. Esquema del movimiento de arena realizado mediante la técnica de scraping. Fuente: IH Cantabria.	18
Figura 5. Localización de la playa de estudio en la provincia de Cádiz, España. Fuente Google Earth.	23
Figura 6. Imagen de la zona de estudio de la playa de Fuentebravía, Cádiz. Con amarillo se observa el polígono de la toma de datos topográficos en 3D, las líneas negras representan los perfiles y el polígono rojo representa la zona de vertido. Fuente Google Earth.	24
Figura 7. Zona de préstamo del scraping (entre las líneas rojas), consta de una zanja de 30 cm de profundidad y 15 m de ancho. Fotografía cortesía del proyecto BeachArt- IH.	25
Figura 8. Zona de vertido del scraping, esta zona consta de 15 m de ancho (entre las líneas rojas). Fotografía cortesía del proyecto BeachArt- IH.	26
Figura 9. Montaje del ensayo de laboratorio en el tanque de oleaje direccional TOD del IH Cantabria en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, . Los canales de interés para el presente documento son en 2 y 4. El canal 2 es para el estudio de la evolución del perfil sin intervención de ningún método asistido y el 4 es para el estudio con perfilado asistido por scraping. Las líneas rojas punteadas representan la trayectoria del láser escáner, las cruces y círculos son las ubicaciones de equipos de oleaje o superficie libre, las zonas rojas representan las zonas de préstamo y las verdes las de vertido. El ancho de cada canal se visualiza en el lateral derecho de la imagen y se entiende que la ubicación de las palas generadoras de oleajes se encuentra en el lateral izquierdo.....	27
Figura 10. Fotografía real del ensayo de laboratorio. En la imagen se aprecian la configuración de los canales. Se visualiza un canal de granalla y otro de gravilla que funcionaba como acceso al tanque, los sensores acústicos de control se pueden apreciar en el borde de los paneles que separan los canales. Fotografía tomada por el autor del informe.....	29
Figura 11. Serie del tiempo del nivel del mar entre el 8 de mayo de 2021 y el 10 de junio de 2021. Fuente: Mareógrafo Bonanza 2 de Puertos del Estado.	32
Figura 12. Serie del tiempo de la altura de ola significativa (Hs) entre el 8 de mayo de 2021 y el 10 de junio de 2021. Fuente: Punto SIMAR 315019035 de Puertos del Estado	33
Figura 13. Serie del tiempo del periodo pico (Tp) entre el 8 de mayo y 10 de junio de 2021. Fuente: Punto SIMAR 315019035 de Puertos del Estado.	34
Figura 14. Serie del tiempo de la dirección de procedencia del oleaje entre el 8 de mayo y 10 de junio de 2021.....	34

Figura 15. Superficie de medición topográfica para Fuentebravia. El polígono rojo muestra la zona de vertido, al mismo tiempo se visualiza las trayectorias de los perfiles, con un recuadro azul se señalan los perfiles representativos para el análisis de la campaña.	35
Figura 16. Mediciones de todas las fechas del perfil natural de la playa de Fuentebravia.	36
Figura 17. Mediciones de todas las fechas del perfil natural de la playa de Fuentebravia separadas en partes para una mejor visualización.	36
Figura 18. Gráfica de acreción (ancho de playa) al nivel de referencia 3 m para el perfil natural de la playa de Fuentebravia en las diferentes fechas de toma de datos.....	37
Figura 19. Representación gráfica del perfil inicial, modificado y final medido, con su respectiva zona de acreción y volumen respectivo. Perfil natural de la playa Fuentebravia.	38
Figura 20. Mediciones de todas las fechas del perfil con scraping de la playa de Fuentebravia.....	39
Figura 21. Mediciones de todas las fechas del perfil con scraping de la playa de Fuentebravia separadas en partes para una mejor visualización.	39
Figura 22. Gráfica de acreción (ancho de playa) al nivel de referencia de la pleamar para el perfil con scraping de la playa de Fuentebravia en las diferentes fechas de toma de datos.....	40
Figura 23. Representación gráfica del perfil inicial, modificado y final medido, con su respectiva zona de acreción y volumen respectivo. Perfil con scraping de la playa de Fuentebravia.....	41
Figura 24. Regresión lineal del ancho de playa en función del tiempo para el perfil natural.	42
Figura 25. Regresión lineal del ancho de playa en función del tiempo para el perfil con scraping. .	43
Figura 26. Evolución del perfil en la configuración 1 de los ensayos de laboratorio para el canal natural.	45
Figura 27. Evolución del perfil en la configuración 2 de los ensayos de laboratorio para el canal natural.	45
Figura 28. Evolución del perfil en la configuración 3 de los ensayos de laboratorio para el canal natural.	46
Figura 29. Perfil de equilibrio de la configuración 1 del canal natural, ajustado al perfil teórico de Dean.	47
Figura 30. Perfil de equilibrio de la configuración 2 del canal natural, ajustado al perfil teórico de Dean.	48
Figura 31. Perfil de equilibrio de la configuración 3 del canal natural, ajustado al perfil teórico de Dean.	48
Figura 32. Evolución del perfil en la configuración 1 de los ensayos de laboratorio para el canal con scraping.	50
Figura 33. Evolución del perfil en la configuración 2 de los ensayos de laboratorio para el canal con scraping.	50
Figura 34. Evolución del perfil en la configuración 3 de los ensayos de laboratorio para el canal con scraping.	51
Figura 35. Perfil de equilibrio de la configuración 1 del canal con scraping, ajustado al perfil teórico de Dean.	53
Figura 36. Perfil de equilibrio de la configuración 2 del canal con scraping, ajustado al perfil teórico de Dean.	53
Figura 37. Perfil de equilibrio de la configuración 3 del canal con scraping, ajustado al perfil teórico de Dean.	54

Índice de Tablas

Tabla 1. Cronograma y configuración de las campañas de campo.	25
Tabla 2. Configuración de los tres ensayos ejecutados en laboratorio. Se observa el valor de la altura de ola significativa, el periodo pico, el parámetro adimensional de grano y la carrera de marea para cada una.....	30
Tabla 3. Origen de los datos relacionados con el clima marítimo de la zona de estudio.	32
Tabla 4. Resumen de los valores de avance en m y volumen de acreción para cada uno de los perfiles de estudio en Cádiz.	41
Tabla 5. Parámetros de oleaje para cada configuración de los ensayos ejecutados en laboratorio.	43
Tabla 6. Caracterización de estado morfodinámico de la playa según el rango de marea modal y al parámetro adimensional de caída de grano.	44
Tabla 7. Profundidad de cierre para cada configuración de laboratorio.	47
Tabla 8. Ancho de playa para cada configuración, visualización de avance.	55

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

El litoral es uno de los ambientes más sensibles a cambios que puede existir en el planeta, allí se producen interacciones de gran importancia entre la atmosfera, el mar y la tierra. (Merlotto y Bértola, 2008). Uno de los principales problemas presentes a nivel mundial es la erosión costera, que puede ser causada por diferentes factores y a diferentes escalas. Los cambios que sufre esta zona, están generados por agentes naturales, como por ejemplo las tormentas, pero también por actividades o causas antrópicas, por lo que, al día de hoy, para la mitigación de los efectos erosivos de las playas existen y se desarrollan en ellas diferentes tipos de actuaciones concretas para su preservación. Algunas actuaciones de mayor escala espacial, se aplican en la ordenación del territorio mediante la Gestión Integrada de Zonas Costeras (Ibarra y Belmonte, 2017).

Por lo anterior, el ancho de la playa es un factor importante para proteger los asentamientos costeros y las comunidades ante la presencia de tormentas o cualquier evento que pueda tener gran impacto erosivo, afectando de manera directa e indirecta algunos sectores económicos como es la industria turística, donde su actividad lucrativa depende o está influenciada por el estado de las playas. Sin embargo, para considerar mantener una zona ancha y óptima para cualquier actividad económica en la costa que pueda verse influenciada por el estado de la misma, es importante tener claridad sobre los procesos y parámetros físicos que actúan sobre ella mantenerlas (González et al., 2010).

La línea de costa está en continuo movimiento según la época estacional donde se encuentre. En invierno, ante la presencia de tormentas se provoca una disminución del volumen de arena en el frente de la playa, esta secuencia erosiva está asociada con la migración mar adentro de sedimentos formando algunas estructuras de acumulación como barras. Cuando las condiciones de oleaje varían de invierno a verano, la evolución del perfil da lugar una movilización de material desde las zonas sumergidas hacia las zonas más someras. Lo cual genera, un avance de la línea de costa en períodos de calma, por lo que las playas tienden a recuperarse naturalmente de la pérdida de arena ocurrida durante las tormentas. Sin embargo,

estos procesos acumulativos (de verano) son típicamente más lentos que los procesos erosivos, y es probable que este no ocurre antes del verano (Monge et al., 2017).

Por lo tanto, teniendo en cuenta la dinámica de movilización de sedimentos y el tiempo de recuperación de una playa ante la pérdida de los mismos, nace el interés de agentes gubernamentales ante la actuación de medidas que puedan preservar, preparar y recuperar sus playas más rápido y la gestión en costas se vuelve necesaria para encontrar respuestas sostenibles para la comunidad y el ecosistema. Dentro de las respuestas sostenibles y más aceptadas hoy en día para la recuperación de la playa están las técnicas de ingeniería blanda, las cuales buscan estrategias de recuperación imitando los procesos naturales del propio ecosistema, sin embargo, estas actuaciones dan lugar a soluciones temporales que generalmente toca repetir de manera periódica para poder mantenerlas (González et al., 2010).

Finalmente, con base en lo explicado, nace la finalidad del presente documento, donde se explica como es el perfil de equilibrio en playas con marea y la implementación de la técnica de scraping para una regeneración más como una técnica de ingeniería blanda, al mismo tiempo que se evalúa su eficacia en un caso real. Por otro lado, se estudia y se valida el mismo tema en técnica de laboratorio, a partir de condiciones controladas con el fin de adquirir una mayor comprensión del fenómeno físico. Para ambos métodos se compara el comportamiento del perfil de playa asistido de manera mecánica y recuperación natural. En el presente informe, en el apartado 2, hay un resumen de los conceptos fundamentales para entender la temática del documento, seguido del apartado 3, donde se da la explicación de la metodología en campañas de campo y laboratorio donde la autora ha participado de forma activa en el desarrollo de los ensayos de laboratorio por aproximadamente 3 meses, finalmente, en los apartados 4 y 5 se muestran los principales resultados con su análisis y las conclusiones del estudio respectivamente.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación BeachArt, dentro del cual el autor realizó prácticas en laboratorio en el desarrollo de los ensayos.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es mejorar el conocimiento del comportamiento del perfil de playa bajo condiciones de acreción en playas con marea en condiciones naturales y con reperfilado mecánico. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la evolución del perfil de playa bajo la influencia de la marea y oleaje de calma típico de la época estival.
- Analizar el perfil de equilibrio en playas con marea.
- Evaluar el efecto del reperfilado asistido mecánicamente (scraping) respecto al aumento del ancho de playa en comparación con la recuperación natural de la misma.
- Analizar la influencia de modificar los parámetros del oleaje incidente sobre los procesos de acreción.
- Conocer técnicas de modelación física en laboratorio y mediciones aplicadas en campo en estudios de dinámica litoral y transporte de sedimentos en playas.

2. Marco conceptual

En este capítulo se describen algunos marcos conceptuales relevantes para el análisis de la temática desarrollada en el documento. Entender las nociones básicas del perfil de equilibrio y los procesos actuantes sobre el mismo que generan acreción de manera natural o mediante el uso de técnicas asistidas para el mismo fin, dan mayor entendimiento de la investigación llevada a cabo en el informe y sientan las bases necesarias para entender la metodología de estudio en las diferentes líneas de actuación. A continuación, se da resumen de conceptos fundamentales.

2.1. Perfil de equilibrio

Una playa con un tamaño de grano determinado, expuesta a unas condiciones constantes de oleaje, desarrollará una forma del perfil que no presentará ningún cambio neto con el tiempo. Esto quiere decir que cuando un perfil alcanza el equilibrio, existirá un balance de fuerzas en cada punto del perfil, tal que el transporte neto sea nulo (Larson,1991). Por lo tanto, según las definiciones existentes de perfil de equilibrio, la existencia de un perfil de equilibrio en la Naturaleza es prácticamente imposible, debido a las variaciones constantes de los distintos agentes dinámicos. En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en el laboratorio, donde las condiciones están controladas (González, 1995).

Por lo anterior, las variaciones de diferentes agentes (oleaje, marea, tamaño de grano) en una playa están acotadas, por lo que la variabilidad del perfil está limitada, pudiéndose definir un estado modal o más frecuente, que consideramos como el perfil de playa real (González, 1995).

- **Modelo de perfil de equilibrio de Dean**

A partir del análisis de perfiles de playa de la costa norte danesa y de Mission Bay (California) por Brunn en 1954, se encontró que los perfiles de playa presentan una relación según la profundidad a una distancia de la línea de costa. Más adelante Dean en 1997 evalúa dicha relación y llega a una expresión general del perfil para cualquier tramo de la playa, la expresión es:

$$h(x) = Ax^n \quad (1)$$

Donde $h(x)$ es la profundidad a una distancia x , A un parámetro de escala que depende, principalmente, de las características sedimentarias y n es un parámetro de forma variable. Los valores determinados por Dean de A y n para un perfil son: $0.1 < n < 1.4$ y $0.0025 < A < 6.31$

Posteriormente, Dean (1987) relacionó el parámetro A con la velocidad de caída de grano obteniendo la expresión:

$$A = kw^{0.44} \quad (2)$$

Donde w es la velocidad de caída de grano expresada en m/s, y k es un parámetro. Por otra parte, Dean expone un mejor ajuste derivado de sus ensayos y encuentra que la mejor aproximación para n es 0.78 y para k es 0.51, por tanto:

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad (3)$$

$$A = 0.51w^{0.44} \quad (4)$$

Debe tenerse en cuenta que estos valores de n y k fueron obtenidos por Dean para unas playas concretas. En este estudio se realizarán los ajustes pertinentes y se obtendrán los mejores valores de estos parámetros para nuestras playas de estudio.

En la Figura 1, se muestra la gráfica de como aumenta el valor del parámetro A al incrementarse el tamaño de grano. Como consecuencia, valores grandes de dicho parámetro nos definirán pendientes pronunciadas del perfil de playa.

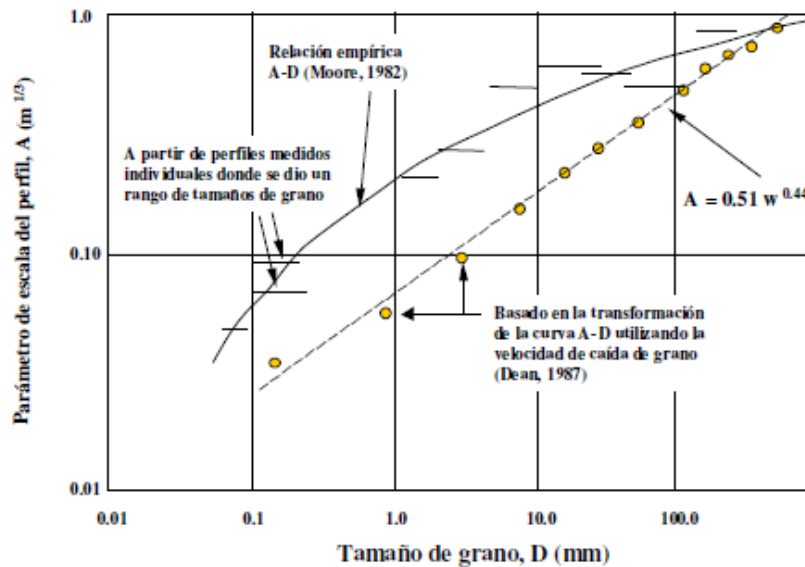


Figura 1. Relación entre el parámetro A y el tamaño de grano propuesta por Moore (1982) y modificada por Dean.

Otras formulaciones han sido desarrolladas en diversas tesis doctorales, teniendo en cuenta la reflexión del oleaje en la playa y el efecto de la carrera de marea, sin embargo, actualmente este modelo de perfil de equilibrio es el más utilizado probablemente por su simplicidad matemática, además de por haber sido ajustado a un número elevado de perfiles de playa. Como vimos en el apartado anterior, los parámetros del perfil propuesto se determinan en función de la dinámica marina y de las características del sedimento, lo que permite la utilización del modelo con carácter predictivo (González, 1995).

Para la comprensión del presente trabajo, basta con entender el perfil de equilibrio final planteado por Dean. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en playas con marea, el perfil se verá afectado por distintos procesos a lo largo de un ciclo de marea ya que la marea genera una variación continua de la profundidad en cada punto del perfil causando modificación de las condiciones hidrodinámicas que afectan a la playa. En un ciclo de marea, la posición de la zona de ascenso-descenso, de rotura y de asomeramiento cambia, de tal forma que el perfil intermareal estará sometido, en diferente medida, a cada uno de estos procesos cada 12 horas y como consecuencia, el perfil evoluciona constantemente para adaptarse a estos cambios, existiendo un desequilibrio permanente. Por tal motivo, hay que aclarar que otros modelos también son apropiados para estudiar el perfil de equilibrio en playas meso y macromareales.

Uno de los principales exponentes para este tipo de playas analizó la forma del perfil de playas españolas de las fachadas Cantábrica, Atlántica y Mediterránea y aunque el presente documento no usará ninguna de las formulaciones del perfil planteada por el autor, un concepto definido por el será de utilidad, el cual es el parámetro adimensional de velocidad de caída del grano, Ω (Bernabeu, 1999).

$$\Omega = \frac{H}{wT} \quad (5)$$

Donde, H es la altura de ola, w la velocidad de caída de grano y T el periodo de la ola.

Dicho parámetro es importante para la determinación de las características reflejantes o disipativas del perfil de playa (ver Figura 2). Para clasificar la playa en el modelo morfológico de evolución, hay que introducir el concepto de Rango de marea modal (M), cuya expresión es:

$$M = \frac{\text{Rango de marea}}{H_s} \quad (6)$$

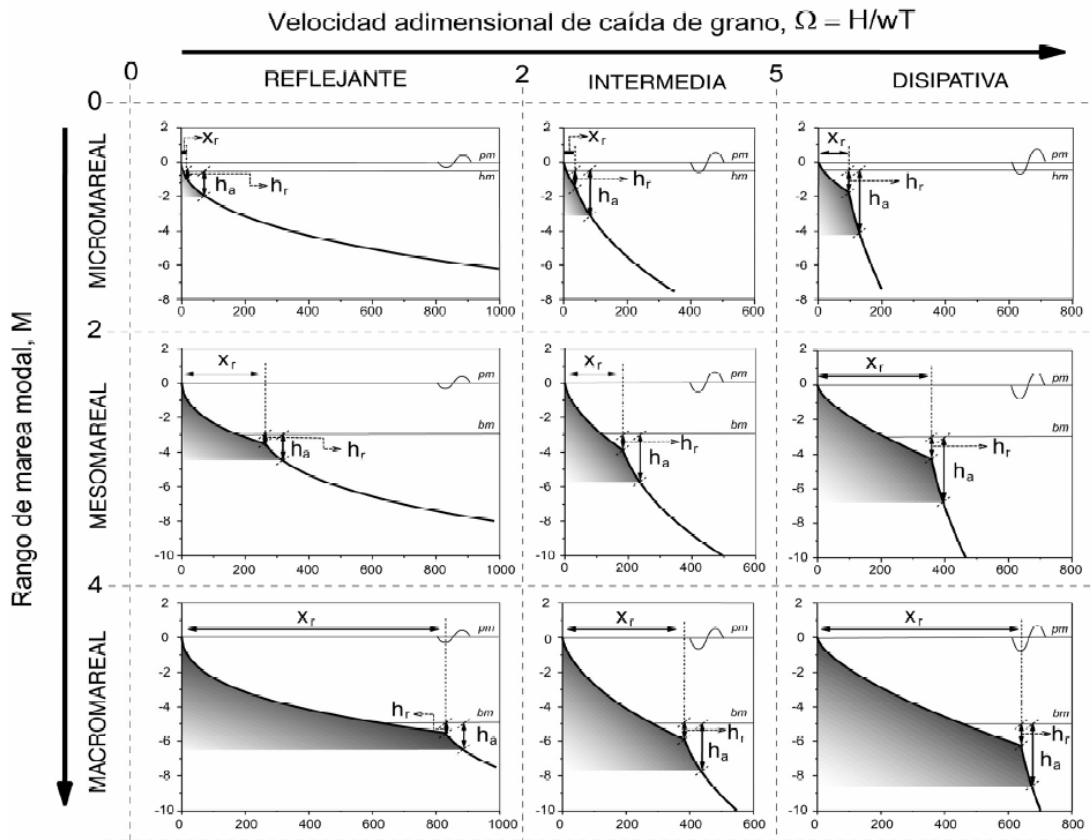


Figura 2. Modelo morfológico de evolución estacional del perfil de playa. pm y bm hacen referencia a la pleamar y la bajamar, respectivamente. La zona sombreada comprende el perfil hasta el límite exterior del perfil de asomeramiento. Las escalas vertical y horizontal se conservan en todos los gráficos presentados en el modelo

Para poder determinar hasta que punto, aguas adentro irá el perfil, es importante introducir el concepto de profundidad de cierre (h^*), la cual representa el límite exterior en la zona litoral del perfil. Hasta esta profundidad se espera que se produzcan grandes cambios en el perfil debido tanto al transporte transversal y longitudinal. h^* está determinado con la siguiente expresión (Birkemeier, 1985):

$$h^* = 1.75 H_{s12} + 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad (7)$$

Donde:

H_{s12} : Altura de ola significativa local excedida 12 horas al año.

T_s : Período significativo asociado a H_{s12} .

2.2. Scraping en playas

El scraping es una técnica de ingeniería blanda usada en ingeniería de costas para la recuperación de la playa desde hace décadas (Bruun, 1983). A pesar de ser tan usada, su efectividad real no ha sido cuantificada, razón por la cual se plantea este estudio.

El scraping consiste en el movimiento de material de una zona a otra de la playa. El material es extraído de la zona intermareal, retirando una capa de arena de unos 30 cm de espesor, y es colocado (1) en el frente de playa extendiendo la berma para generar más playa seca o (2) en el backshore junto a la duna. En este estudio nos centraremos en la opción (1) y analizaremos la eficacia del scraping para generar un mayor ancho de playa desde el inicio del verano. La Figura 3, muestra de forma clara y concisa la técnica de scraping.



Figura 3. Esquema del movimiento de arena realizado mediante la técnica de scraping. Fuente: IH Cantabria.

El propósito original del scraping es el fortalecimiento de la parte superior de la playa, sin embargo, en el presente estudio se quiere analizar una nueva utilidad de esta técnica para tener una playa seca más ancha desde el inicio del verano. Por otro lado, el scraping también puede ser útil en caso de tormentas, ya que el material acumulado se erosionará en primer lugar y protegerá así los sistemas de dunas o acantilados. Este método se diferencia de la alimentación de las playas porque no se introducen nuevos volúmenes de arena en el sistema que reemplacen el material erosionado. En cambio, la arena se mueve de un lugar a otro en la playa (Kratzmann et al. 2008).

Esta técnica se utiliza para trasladar pequeños volúmenes de arena acumulada en playa superior. Es importante eliminar solo la cantidad de arena que se puede reponer de forma natural. Esta es la razón por la que el raspado de playas debería realizarse en playas principalmente expuestas a la erosión estacional. Para las playas expuestas a la erosión a largo plazo, esta medida no parece factible, porque en esta situación la medida no contribuiría a la estabilidad general del perfil de la playa. Si se lleva a cabo en situaciones en las que la arena se ha acumulado repetidamente durante un período de tiempo, la técnica puede aumentar el volumen de la playa seca, proporcionando algo de mitigación para la erosión a corto plazo. (Herrington, 1994).

En comparación con otras medidas de defensa costera (como la construcción de un dique o espigones), este enfoque tiene una derogación relativamente baja en el sistema ecológico (Smith et al. 2011). El raspado de playa solo puede tener lugar en playas de arena, que a menudo son utilizadas por los turistas y, por lo tanto, proporcionan una fuente de ingresos para las comunidades vecinas. Una reestructuración mecánica de la playa puede perturbar las actividades recreativas. Por ello se recomienda emprender la medida en épocas de baja actividad turística si es posible (Byron Shire Council, 2010).

2.3. Técnicas de laboratorio

Actualmente los experimentos de laboratorio de lecho móvil en playas dominadas por las olas en un entorno de marea meso-macro son escasos, por lo que, en laboratorio, lo ideal es que con base en los resultados obtenidos por modelos numéricos, análisis climático y evaluación de la dinámica litoral, se diseñe un experimento físico que asemeje sus parámetros a aproximaciones realistas con un debido escalamiento de sus variables, con el fin de que se permite reproducir correctamente secuencias erosivas y acumulativas de una playa con la consideración de las mareas, además, de la evaluación de la recuperación asistida bajo las mismas condiciones que un perfil natural.

Para trabajar de manera adecuada en laboratorio, en los casos generales de transporte de sedimentos en ríos, estuarios o en el mar, los flujos son siempre con superficie libre, donde las velocidades y las oscilaciones están controladas por la gravedad. Esto quiere decir que el flujo deberá escalarse siempre manteniendo la similitud entre los números de Froude en el modelo y prototipo (Grasso et al. 2009 con fw según Soulsby 1997). Por lo tanto:

Se asume que el flujo se escala con las formulaciones de Froude, con escala de longitudes N_L (prototipo/modelo) y escala de tiempos y velocidades:

$$N_T = N_L^{0.5} \quad (8)$$

Por lo que respecta a las leyes de escala para el sedimento, se parte del conocimiento de que las fuerzas de tensión tangencial en el fondo determinan el transporte por fondo, mientras que el transporte en suspensión viene determinado por el flujo oscilatorio, las corrientes medias y la velocidad de caída del grano.

Por esta razón se trata de buscar un sedimento que mantenga en modelo y prototipo la similitud de los parámetros de Shields, el parámetro de Reynolds del grano y el de velocidad adimensional de caída del grano.

El número de Shields viene determinado por la expresión:

$$S = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gD} = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (9)$$

Donde:

$$\tau_0 = 0.5\rho f_w U_\delta^2 \quad (10)$$

y como factor de fricción en el fondo debido al oleaje se puede tomar la expresión de Soulsby (1997):

$$f_w = 0.993 \left(\frac{D}{U_\delta T} \right)^{0.52} \quad (11)$$

Donde:

D = diámetro característico del sedimento (D_{50})

U_δ = velocidad orbital en el límite superior de la capa límite de fondo

T = Periodo de pico del oleaje

τ_0 = tensión tangencial máxima en el fondo

ρ = densidad del agua

ρ_s = densidad del sedimento

Igualando el número de Shields en modelo y prototipo se obtiene la siguiente relación entre la escala de tamaño de grano y las escalas de densidad y longitud:

$$N_D = \frac{N_L}{N_\Delta^{2.083}} \quad (12)$$

Donde Δ es la densidad sumergida relativa del sedimento:

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \quad (13)$$

Número de Reynolds del grano controla la estructura de la capa límite en las proximidades del fondo.

$$R_{e*} = \frac{u_* D}{\nu} \quad (14)$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática del agua

u^* : Velocidad de fricción en el fondo

La velocidad de fricción se define como:

$$u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Si asumimos que la escala del nº de Reynolds del grano es la unidad (igualando Reynolds en modelo y prototipo) y que la escala de viscosidad es también la unidad, se tiene:

$$N_D = N_L^{-0.19} \quad (16)$$

En un modelo donde dominara el transporte por fondo, el mantenimiento de los números de Shields y de Reynolds del grano implicaría que la escala del tamaño del grano y de la densidad de los mismos debería cumplir las ecuaciones (12) y (16): A partir de estas ecuaciones se obtiene:

$$N_\Delta = N_L^{0.571} \quad (17)$$

Estas ecuaciones, se usarán en el apartado 3.2 de metodología para el diseño de los ensayos de laboratorio

3. Metodología

Para llevar a cabo el presente trabajo cuya finalidad es el estudio del perfil de equilibrio en playas con marea y la recuperación del mismo de manera natural y con perfilado asistido (scrapping), se procede bajo 2 líneas de aproximación; la primera, desarrollada en campo en condiciones in-situ en la playa de Fuentebravía situada en Cádiz, la segunda, el montaje y ejecución en condiciones controladas a escala de laboratorio de ensayos físicos.

A continuación, se describe la metodología seguida para la toma de datos en cada una de estas dos líneas de aproximación.

3.1. Campaña de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo en la provincia de Cádiz, España, (Ver Figura 4). Allí, se seleccionó una playa para la toma de datos y la ejecución de las campañas:

La playa de Fuentebravía, una playa abrigada por dos espigones separados a una longitud de 580 m aproximadamente (extensión aproximada de la playa) y un área aproximada de 63500 m², esta playa cuenta con lajas rocosas de origen natural al pie de la misma. (ver Figura 6).



Figura 4. Localización de la playa de estudio en la provincia de Cádiz, España. Fuente Google Earth.

Con mayor detalle, en la Figura 7, se muestra la playa de Fuentebravía con los respectivos polígonos que señalan el lugar específico de elaboración de la campaña. Los pasos para la adquisición de la información se explican a continuación:

1. Se realiza el levantamiento o recogida de arena, de una geometría aproximadamente rectangular con 200 metros de longitud y 15 m de ancho con 30 cm de profundidad.
2. La arena removida del inciso 1, se vierte en el polígono rojo de la playa (zona de vertido que corresponde a la berma). El área de vertido fue de aproximadamente 3000 m² en una geometría similar a la de préstamo.
3. Las actuaciones se llevaron a cabo alrededor de la hora de la bajamar (inciso 1 y 2). Antes de realizar cualquier modificación se realizaron mediciones topográficas iniciales, posteriormente, se realizó la modificación del terreno al siguiente día.



*Figura 5. Imagen de la zona de estudio de la playa de Fuentebravía, Cádiz. Con amarillo se observa el polígono de la toma de datos topográficos en 3D, las líneas negras representan los perfiles y el polígono rojo representa la zona de vertido.
Fuente Google Earth.*

Es importante resaltar que el scraping solo se aplicó en 300 metros en la zona central longitudinalmente, el resto de la playa fue usado como referencia o control para observar la evolución de la misma sin ningún tipo de actuación. En las Figuras 8 y 9 se observan unas fotografías de la zona de préstamo y vertido.

En cuanto a las mediciones de la topografía se procedió de la siguiente forma:

1. Topografía tridimensional (3D) de la playa seca y zona intermareal antes de hacer las respectivas modificaciones
2. Topografía tridimensional (3D) en el tramo de playa donde se realizaron las actuaciones.
3. Medición en Perfiles que son los registros topográficos de los perfiles de playa (orientación perpendicular a la línea de costa) indicados en la anterior ilustración. El transecto de los perfiles fue la misma en todas las fechas en las que se realizaron mediciones. En total se registraron 7 perfiles para el estudio de la playa.

Dada la importancia de realizar las medidas durante la bajamar para poder medir la máxima extensión posible de playa por medios terrestres, se realizaron las mediciones durante las dos horas anteriores y posteriores a la máxima bajamar. La siguiente tabla muestra un esquema de las mediciones tomadas, con su respectiva hora, día y tipo de campaña.

Tabla 1. Cronograma y configuración de las campañas de campo.

Campaña	Fecha	Hora bajamar	Tipo de Campaña
1	11/05/21	10:36	3D: Terreno inicial
2	12/05/21	11:05	3D: Terreno modificado
3	18/05/21	14:1	Perfiles
4	27/05/21	10:44	3D
5	01/06/21	15:05	Perfiles
6	10/06/21	10:15	Perfiles

Finalmente, con la información topográfica obtenida, se procede al uso de sistemas de información geográfica, para poder visualizar las superficies obtenidas, a partir del método de interpolación de ponderación de distancia inversa, el cual estima los valores de celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento y la interpolación de “hurto de área” que funciona usando un subconjunto de muestras alrededor de punto de consulta y se garantiza que las alturas interpoladas están dentro del rango de muestras utilizadas. Los respectivos cambios en el tiempo para los perfiles y sus respectivas modificaciones se mostrarán con mayor detalle en el siguiente capítulo del presente informe (resultados).



Figura 6. Zona de préstamo del scraping (entre las líneas rojas), consta de una zanja de 30 cm de profundidad y 15 m de ancho. Fotografía cortesía del proyecto BeachArt- IH.

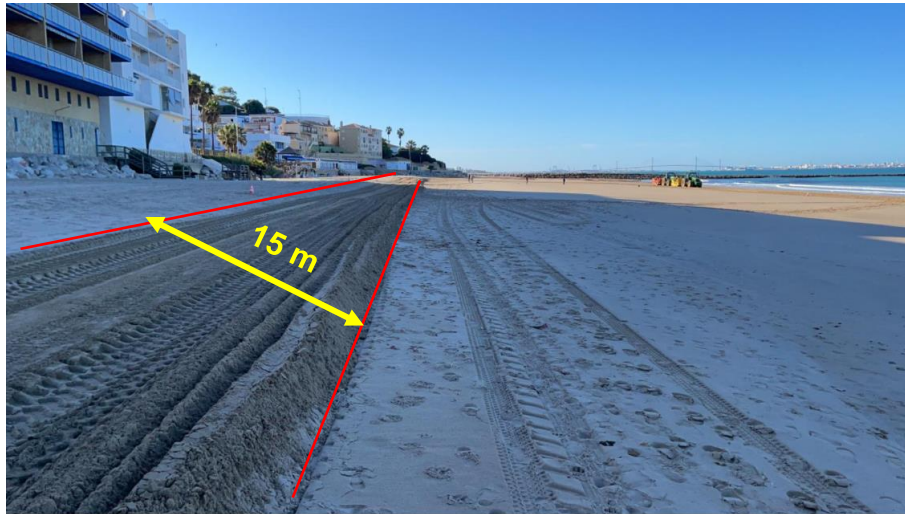


Figura 7. Zona de vertido del scraping, esta zona consta de 15 m de ancho (entre las líneas rojas). Fotografía cortesía del proyecto BeachArt- IH.

3.2. Ensayos de laboratorio

Los ensayos se han diseñado para modelar físicamente los procesos de acreción y obtener el perfil de equilibrio en condiciones naturales y asistido mecánicamente con el scraping. En términos generales, se hace uso de un tanque, con una geometría específica en el lecho sobre el cual actúa una configuración de oleaje y marea para generar así un ambiente hidrodinámico en el que haya relación entre el sedimento y el agua. Los ensayos se realizan a escala reducida para poder modelar un perfil de playa completo (desde la playa seca a la profundidad de cierre h^*) dentro del tanque. El material a usar que simula los sedimentos del lecho deberá ser sintético (de densidad menor a la de la arena natural) para reducir los efectos de escala sobre los procesos de transporte de sedimento. El tamaño y densidad de este sedimento sintético fue calculado acorde con la escala geométrica elegida, asegurando el cumplimiento de las formulaciones de Froude, Shields y Reynolds (ver apartado 2.3 del marco conceptual y apartado siguiente).

La instalación escogida para el ensayo es el Tanque de Oleaje Direccional (TOD) ubicado en la escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos en el que se construyeron 6 canales para simular las condiciones naturales de una playa real y diversas técnicas de recuperación asistida planteada (scraping). Sin embargo, para fines de este informe, solo se usará la información pertinente a los canales 2 y 4, los cuales modelan la geometría natural y con scraping (vertiendo el sedimento en la berma de la playa). El resto de canales son objeto de estudio de otras investigaciones (ver Figura 8). El ensayo de laboratorio fue simulado teniendo en

cuenta la acción de la marea y el oleaje en conjunto, donde para cada uno de los canales se contó con dispositivos de medida necesarios (sensores de nivel capacitivos y acústicos) para llevar a cabo la ejecución del mismo de manera controlada. Por otro lado, se usaron perfiladores laser para medir la geometría de la superficie del sedimento (granalla) en cada bajamar.

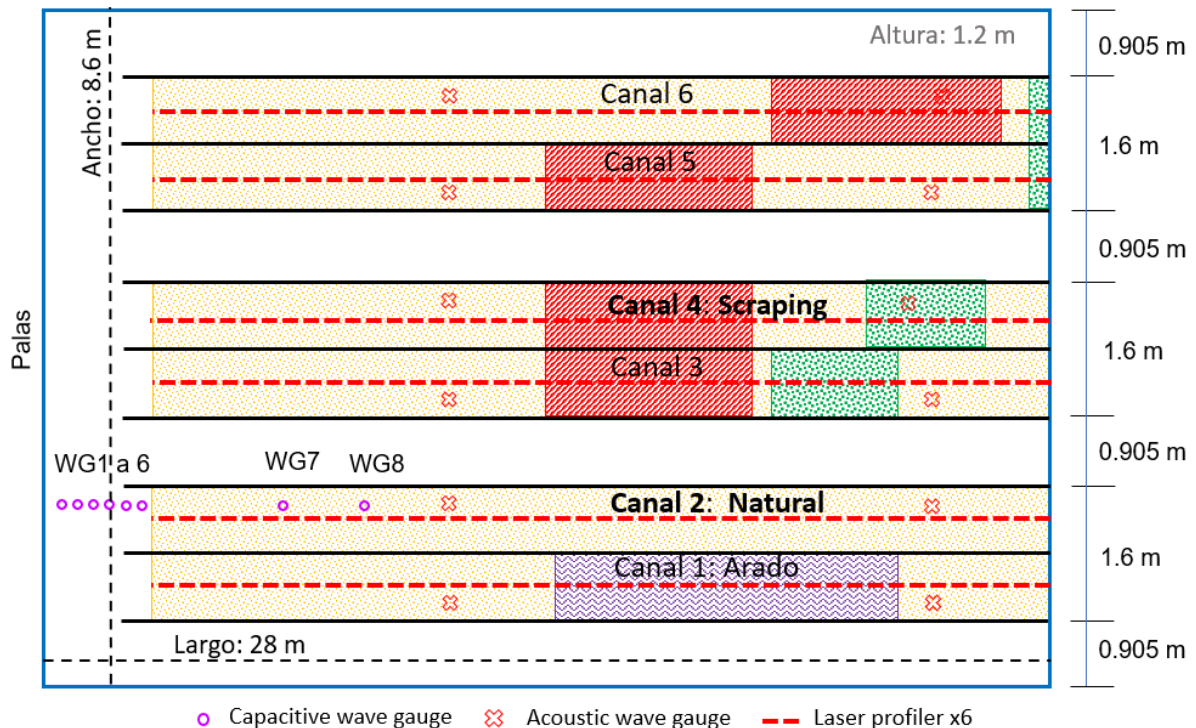


Figura 8. Montaje del ensayo de laboratorio en el tanque de oleaje direccional TOD del IH Cantabria en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, . Los canales de interés para el presente documento son en 2 y 4. El canal 2 es para el estudio de la evolución del perfil sin intervención de ningún método asistido y el 4 es para el estudio con perfilado asistido por scraping. Las líneas rojas punteadas representan la trayectoria del láser escáner, las cruces y círculos son las ubicaciones de equipos de oleaje o superficie libre, las zonas rojas representan las zonas de préstamo y las verdes las de vertido. El ancho de cada canal se visualiza en el lateral derecho de la imagen y se entiende que la ubicación de las palas generadoras de oleajes se encuentra en el lateral izquierdo.

A continuación, se explica en detalle la configuración del laboratorio, la instrumentación usada y el debido escalado de las variables intervenidas en el modelado físico.

3.2.1. Escalas

A partir de las ecuaciones de Froude, Shields y Reynolds mostradas en la metodología se deducen las ecuaciones simplificadas (eq. 12, 16 y 17) que permiten realizar el diseño de un ensayo a escala reducida empleando sedimento sintético de densidad menor para evitar efectos de escala en los procesos de transporte.

Nuestro prototipo corresponde a una playa de arena fina sometida a un oleaje típico del Cantábrico. Por otro lado, el sedimento sintético disponible en el mercado tiene una densidad de 1500 Kg/m^3 , mientras que el sedimento real en prototipo tiene densidad de 2650 Kg/m^3 . Introduciendo estos valores en la eq 17 se obtiene una escala de longitudes de 9 y con la eq 16 una relación entre los tamaños de grano prototipo y modelo de $D_{50}^{\text{prototipo}} = 0.67 D_{50}^{\text{modelo}}$. Una arena fina típica del Cantabrico tiene $D_{50}^{\text{prototipo}} = 0.21 \text{ mm}$ por lo que el sedimento sintético utilizado tiene $D_{50}^{\text{modelo}} = 0.32$.

La longitud del TOD es de 24 m. Comprobamos que con la escala de longitudes $N_L = 9$, podemos simular todo el perfil de playa dentro del tanque. Para ello tenemos en cuenta que simularemos un oleaje de calma típico de verano y verificamos que el perfil de la playa seca hasta la h^* esté contenido dentro del tanque. Todos los oleajes simulados cumplen esta condición. La relación entre la escala de longitudes y temporal (eq. 8) nos indica que la escala de tiempos $N_T = 3$.

3.2.2. Instrumentación y diseño

Se contempla la construcción inicial de una batimetría fija de hormigón entre paneles longitudinales que dividen el ancho del tanque en 10 canales (6 contienen sedimento y 4 proporcionan acceso lateral a los sensores). Se colocará sedimento sintético de tamaño medio 0.32 mm y densidad 1500 Kg/m^3 en 6 de los canales.

Entre las tareas relativas a la disposición inicial de la geometría de ensayo se contempla:

1. Instalación de paneles de forma longitudinal al tanque de forma que constituyan una separación continua entre las geometrías a ensayar.
2. Disposición de batimetría de hormigón según la geometría de diseño entre los paneles anteriores.

3. Vertido del sedimento sintético en el interior de cada uno de los 6 canales de ensayo y su disposición de forma precisa con la geometría de ensayo.
4. Instalación de los sensores de medida.



Figura 9. Fotografía real del ensayo de laboratorio. En la imagen se aprecian la configuración de los canales. Se visualiza un canal de granalla y otro de gravilla que funcionaba como acceso al tanque, los sensores acústicos de control se pueden apreciar en el borde de los paneles que separan los canales. Fotografía tomada por el autor del informe.

Dentro de la instrumentación más importante se encuentra la configuración de palas generadoras de oleaje y el distanciómetro laser que pasará encima del tanque en una grúa para obtener los perfiles en cada bajamar. Es importante resaltar que la marea es automatizada, con lo que se garantiza el ascenso y descenso del nivel del agua para que simule una onda de marea. Las olas se generan simultáneamente para modelar el efecto conjunto de marea y oleaje.

La disposición inicial del sedimento al inicio de cada ensayo representa un perfil típico de invierno. Para obtener esta geometría se somete al sedimento a 2 ciclos de marea con oleaje de temporal con un H_s y T_p de 0.2 m y 2.3 s respectivamente a escala de modelo, el valor de Ω para tal configuración es de 5 desarrollándose así

un perfil disipativo. El oleaje y marea son los mismos para todos los canales, de forma que se garantiza que la geometría inicial del sedimento es la misma para todos ellos. Sobre esta geometría se simulan cada una de las 3 configuraciones de ensayo con oleaje de calma (modificando las características de marea y oleaje, los valores específicos de la configuración se ven en la Tabla 2), para cada configuración se garantizó que el valor de Ω fuese menor a 2, garantizando de esta forma la generación de un perfil con morfología reflejante y por lo tanto la generación de acreción sobre el mismo. Cada ensayo consiste en la simulación de 6 ciclos de marea con duración de 4h cada uno.

Tabla 2 Configuración de los tres ensayos ejecutados en laboratorio. Se observa el valor de la altura de ola significativa, el periodo pico, el parámetro adimensional de grano y la carrera de marea para cada una.

No. de configuración	Hs	Tp	Ω	Carrera de Marea
1	0.06	3	1.15	0.3 m
2	0.04	3	0.77	0.2 m
3	0.033	1.67	1.15	0.2 m

Cada una de las configuraciones llevadas a cabo en el laboratorio ha tomado aproximadamente un mes de operación ejecutadas en los meses junio, julio y agosto del presente año. En cuanto a mi participación en el laboratorio esta se dio desde el control y verificación de los ensayos, y finalmente en el procesado de las simulaciones y los respectivos resultados.

4. Resultados y análisis

A partir de lo anterior (Metodología), se obtienen los perfiles medidos derivados del trabajo in-situ y de laboratorio. Para cada una de estas líneas de estudio, a partir de la información se evaluó la evolución del perfil y los procesos de acreción derivados a la recuperación natural y scraping. A continuación, se muestran los resultados obtenidos y analizados tanto de la campaña de campo como del experimento de laboratorio.

4.1. Campañas de campo

En la playa de Fuentebravía se realizaron mediciones en 7 perfiles, 3 de ellos corresponden a perfiles de control tomados en la playa natural y los 2 restantes se midieron en la zona en la que se llevó a cabo el reperfilado (scraping). Para el análisis del estudio del presente documento se eligieron dos perfiles representativos, uno con intervención mecánica y otro donde la evolución se dio de manera natural durante todo el tiempo.

Para el análisis de las campañas, es importante tener en cuenta las condiciones oceanográficas para la época donde fueron desarrolladas, por consiguiente, se obtuvo la información del nivel de marea y oleaje de un punto de la base de datos suministrada por puertos del estado del mareógrafo y punto SIMAR más cercano a las playas de estudio (ver Tabla 3).

Tabla 3. Origen de los datos relacionados con el clima marítimo de la zona de estudio.

Variable	Procedencia	Nombre	Ubicación
Marea	Mareógrafo	M. Bonanza 2	Longitud: 6.34° O Latitud: 36.80° N (Morro del Dique de Abrigo de Bonanza, en la desembocadura del Guadalquivir)
Oleaje (Hs, Tp y Dir.)	Punto SIMAR (Modelado)	Punto SIMAR: (315019035)	Longitud: 6.45° O Latitud: 36.76° N

- **Nivel del mar**

El nivel del mar determina el rango de acción de las dinámicas marinas en nuestra zona de estudio y define el ancho de la zona intermareal que se ha medido topográficamente mediante medios terrestres. La figura 10 muestra la serie de niveles registrada por el mareógrafo Bonanza 2 durante el periodo de estudio, de la que podemos extraer los niveles de pleamar y bajamar registrados durante las campañas de campo.



Figura 10. Serie del tiempo del nivel del mar entre el 8 de mayo de 2021 y el 10 de junio de 2021. Fuente: Mareógrafo Bonanza 2 de Puertos del Estado.

Por consiguiente, el nivel de la pleamar y bajamar usados para el procesado de la información y análisis de los perfiles fue el valor máxima y mínima marea respectivamente del periodo de estudiado. Por otro lado, todos los datos disponibles se han referido al cero del mareógrafo de Bonanza. Los datos topográficos se recibieron referidos al datum del cero geodésico nacional, por lo que han sido referidos al cero del mareógrafo teniendo en cuenta que ambos niveles distan 1.419 m (dato obtenido de la web de puertos del estado).

- **Oleaje**

Teniendo en cuenta los diferentes procesos dinámicos que afectan al perfil de playa, conocer las condiciones del oleaje es relevante para entender la morfología generada que se relaciona con los parámetros hidrodinámicos y sedimentarios, estas relaciones confieren capacidad predictiva a la forma del perfil conociendo las características del oleaje incidente y el tamaño de grano de la playa, y dan una respuesta o explicación a los procesos de avance o retroceso de misma. Por consiguiente, se muestran las series de tiempo relacionadas con el oleaje para la futura relación y entendimiento del comportamiento de los perfiles medidos en el tiempo.

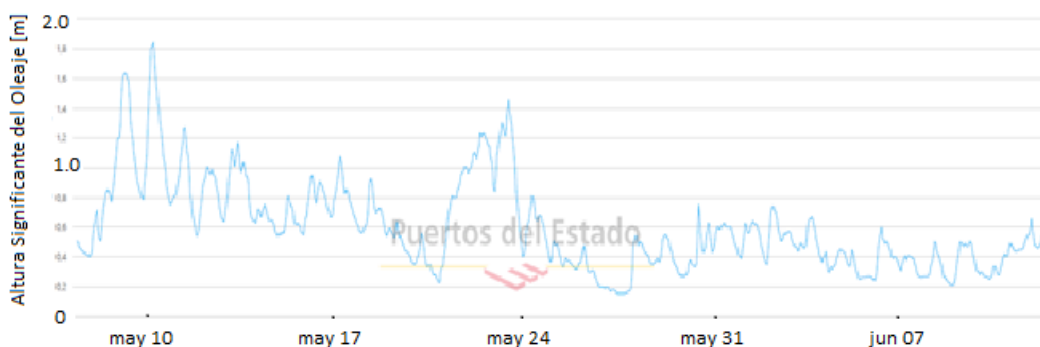


Figura 11. Serie del tiempo de la altura de ola significativa (Hs) entre el 8 de mayo de 2021 y el 10 de junio de 2021.
Fuente: Punto SIMAR 315019035 de Puertos del Estado



Figura 12. Serie del tiempo del periodo pico (T_p) entre el 8 de mayo y 10 de junio de 2021. Fuente: Punto SIMAR 315019035 de Puertos del Estado.

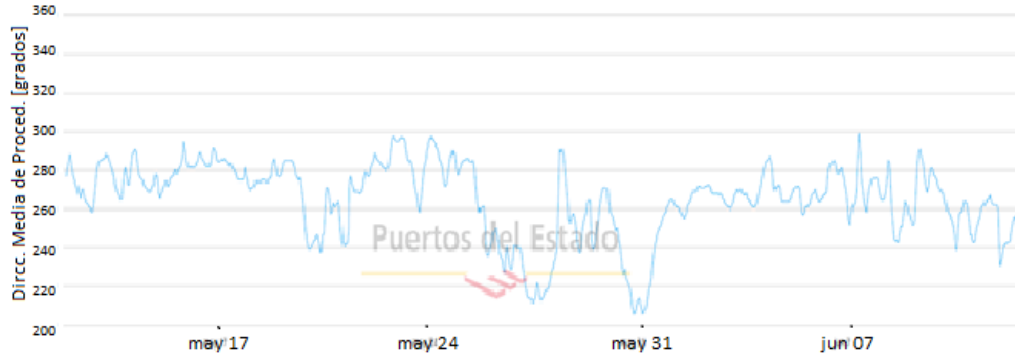


Figura 13. Serie del tiempo de la dirección de procedencia del oleaje entre el 8 de mayo y 10 de junio de 2021.

De las anteriores series de tiempo, respecto a las diferentes variables del oleaje se puede concluir que hubo dos periodos donde la altura de ola significativa consideradamente mayor al resto, las fechas corresponden aproximadamente entre el 09 al 12 de mayo y el 21 al 24 de mayo, con H_s superiores al metro, siendo la máxima 1.82 m y 1.46 m para cada uno de los periodos nombrados respectivamente. En época de calma la altura de ola significativa no supera los 0.8 m.

El periodo pico presenta mayor variación durante toda la serie, los máximos valores de T_p son próximos a los 10 s y corresponden al mes de mayo, siendo estos valores coherentes con la presencia de mayor oleaje nombrada anteriormente. La dirección de procedencia se comporta uniformemente durante toda la serie de tiempo medida, la cual va desde el S hasta el W.

Playa de Fuentebravía

De los 7 perfiles obtenidos y analizados en cada una de las fechas en las que se realizó campaña de campo, como se visualiza en la figura 14, se escoge el perfil No. 4 y 6 correspondiente al perfil natural y asistido mecánicamente por scraping respectivamente para mostrar los resultados de evolución de la costa.

De la figura 14, la zona que se encuentra dentro un polígono rojo, corresponde a la zona de vertido de arena siendo, el polígono gris la zona completa en la que se realizaron las mediciones de cambio de la morfología periódicamente. Las respectivas evoluciones y modificaciones de los perfiles seleccionados se visualizan a continuación (en perfil 4 y 6).



Figura 14. Superficie de medición topográfica para Fuentebravía. El polígono rojo muestra la zona de vertido, al mismo tiempo se visualiza las trayectorias de los perfiles, con un recuadro azul se señalan los perfiles representativos para el análisis de la campaña.

- **Perfil natural (correspondiente al No. 6 de la playa Fuentebravia)**

Para analizar la evolución de la playa sin scraping, se visualizan las mediciones obtenidas en campo, A continuación, la evolución del perfil natural.

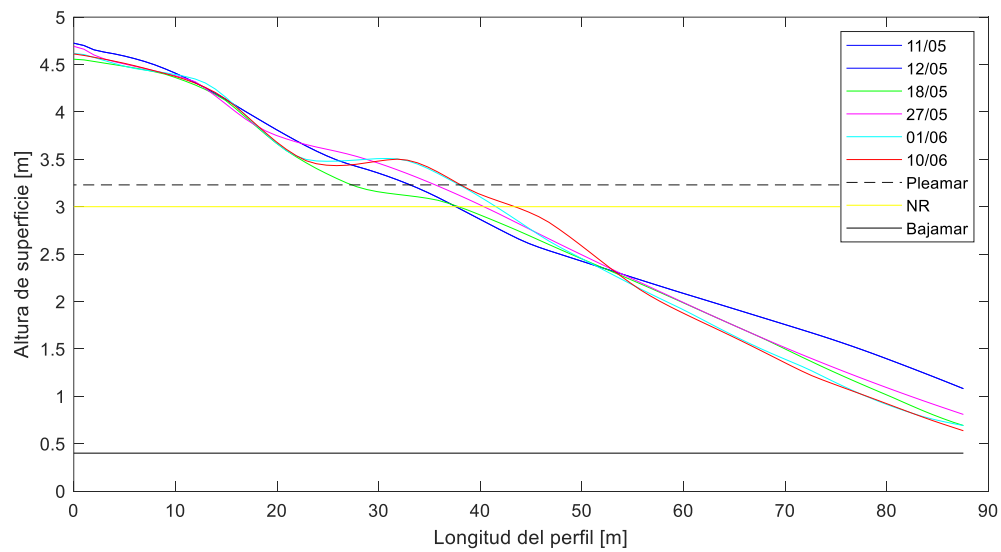


Figura 15. Mediciones de todas las fechas del perfil natural de la playa de Fuentebravia.

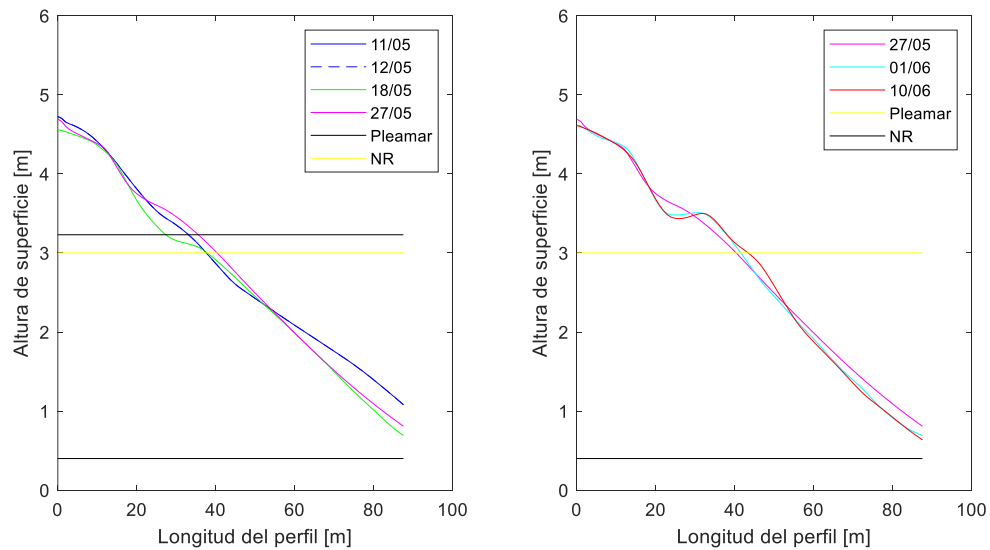


Figura 16. Mediciones de todas las fechas del perfil natural de la playa de Fuentebravia separadas en partes para una mejor visualización.

Las anteriores gráficas muestran la evolución del perfil sin llevar a cabo ningún método de perfilado, por lo que su evolución es completamente natural. Para realizar el seguimiento de la evolución del perfil se selecciona un nivel de referencia señalado a 3 m de altura de la superficie (ver Figuras 15 y 16). El valor exacto en la longitud de perfil a dicho nivel, representa la distancia entre el origen del perfil en el paseo marítimo hasta el nivel del mar a la cota de 3 m (antes del nivel de pleamar) y es sobre este punto que se cuantifica el ancho de playa en cada campaña.

De las anteriores Figuras, es posible visualizar que hasta el 18 de mayo no hubo casi avance de playa (40 cm), sin embargo, a partir de esa fecha la tasa de acreción aumenta significativamente, dando como resultado final a la última fecha de medición, un avance de la línea de costa de 5.6 metros en la cota de 3 m (ver Figura 17), la curva de acreción se puede ver con mayor detalle a continuación.

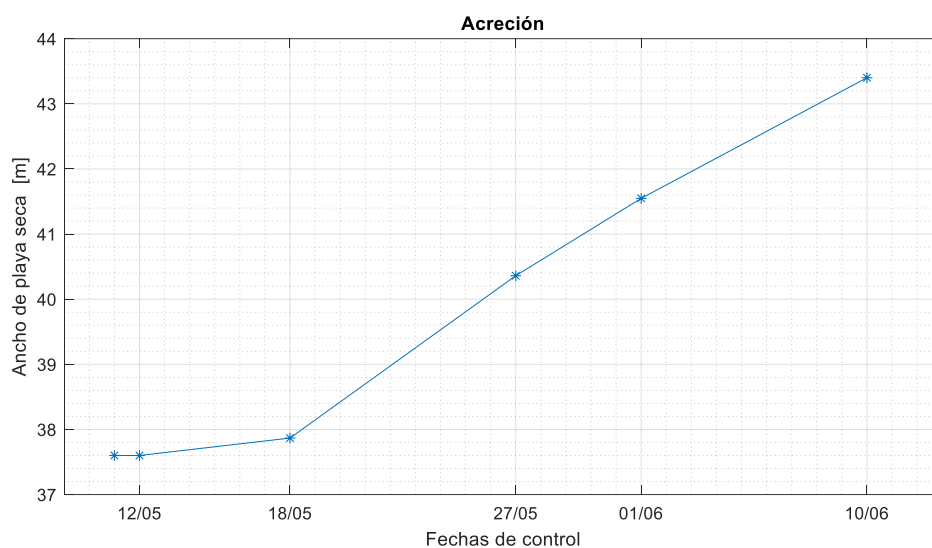


Figura 17. Gráfica de acreción (ancho de playa) al nivel de referencia 3 m para el perfil natural de la playa de Fuentebravia en las diferentes fechas de toma de datos.

Se presentan 5.6 metros de recuperación del frente de playa al nivel de referencia de 3 metros elegido para Fuentebravia desde el 11 de mayo hasta el 10 de junio, según la pendiente de la curva de acreción se puede afirmar que la tasa de acumulación diaria fue aproximadamente igual durante todo el mes, ya que hay un comportamiento aproximadamente lineal al unir los puntos con el avance de playa en las respectivas fechas de control. Para lograr el avance logrado, a partir de donde se empieza a generar acreción se requieren de $5.7 \text{ m}^3/\text{m}$ de longitudinal de playa (ver Figura 18)

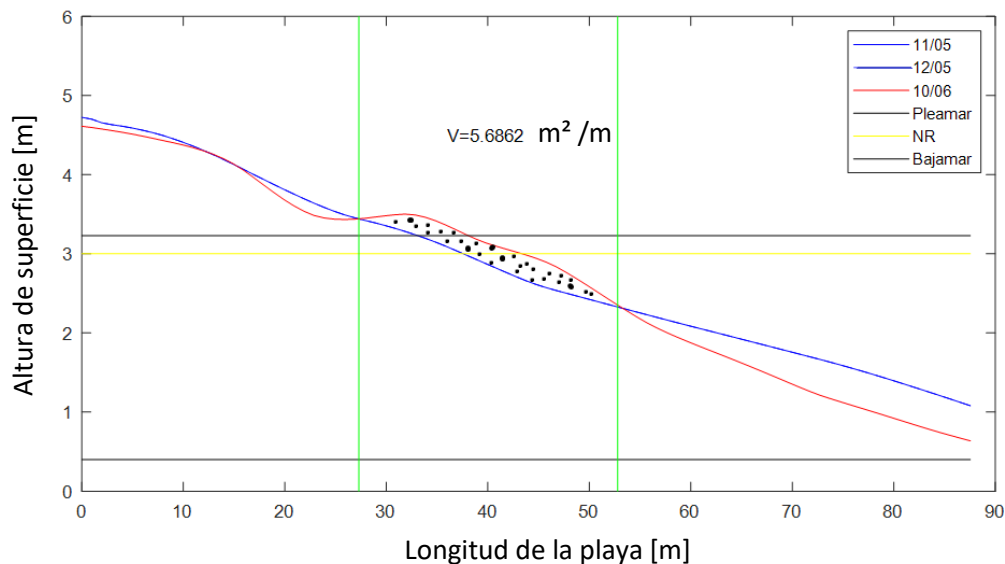


Figura 18. Representación gráfica del perfil inicial, modificado y final medido, con su respectiva zona de acreción y volumen respectivo. Perfil natural de la playa Fuentebravia.

- **Perfil con scraping (correspondiente al No. 4 de la playa Fuentebravia)**

Nuevamente se visualizan las mediciones obtenidas al nivel de referencia con cota de 3 metros en Fuentebravia. El perfil obtenido para cada una de las fechas corresponde a uno de los transectos que pasa por la zona de scraping, lo cual se detalla en la Figura 19, donde en línea punteada se aprecia el relleno del scraping en el perfil.

De la Figura 19 se puede observar que se realiza un avance mecánico de 8 metros de longitud en la zona emergida (ver cuadro negro), sin embargo, en el nivel de referencia, dentro de la zona intermareal se observa un retroceso de la línea de costa el 12 de mayo en respuesta a la elaboración del scraping, correspondiente a la zona de préstamo que se encuentra sobre esta cota con aproximadamente 30 m de ancho y 0.3 m de profundidad. No obstante, a medida que pasan los días se aprecia la acumulación de arena, avanzando el perfil de playa en la cota de pleamar (Figura 20).

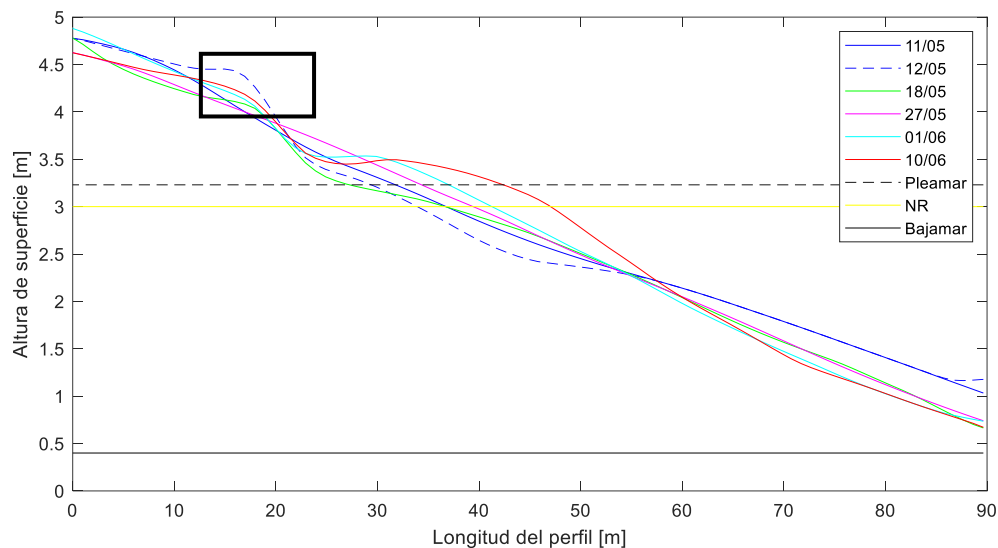


Figura 19. Mediciones de todas las fechas del perfil con scraping de la playa de Fuentebravía.

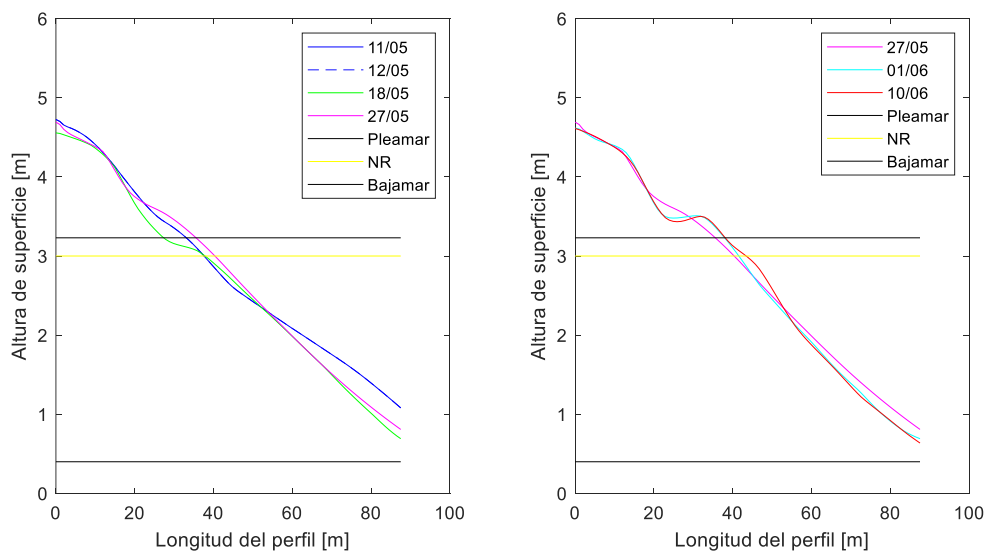


Figura 20. Mediciones de todas las fechas del perfil con scraping de la playa de Fuentebravía separadas en partes para una mejor visualización.

Según el gráfico de acreción (Figura 21) y como se mencionó anteriormente, al nivel de referencia se realizó préstamo de arena para el scraping, sin embargo, al igual que en el perfil natural de Fuentebravía expuesto anteriormente, hay una clara tendencia de acreción a partir del 12 de mayo a lo largo del tiempo.

La berma inicial (18 de mayo) generada por la acreción presenta su cota máxima en 3.2 m, finalmente, para el 10 de junio avanza 9.8 m sobre el nivel de referencia

e incrementando su cota a 3.6 m. Al igual que en el perfil natural, el avance de playa se da de forma casi lineal en función del tiempo.

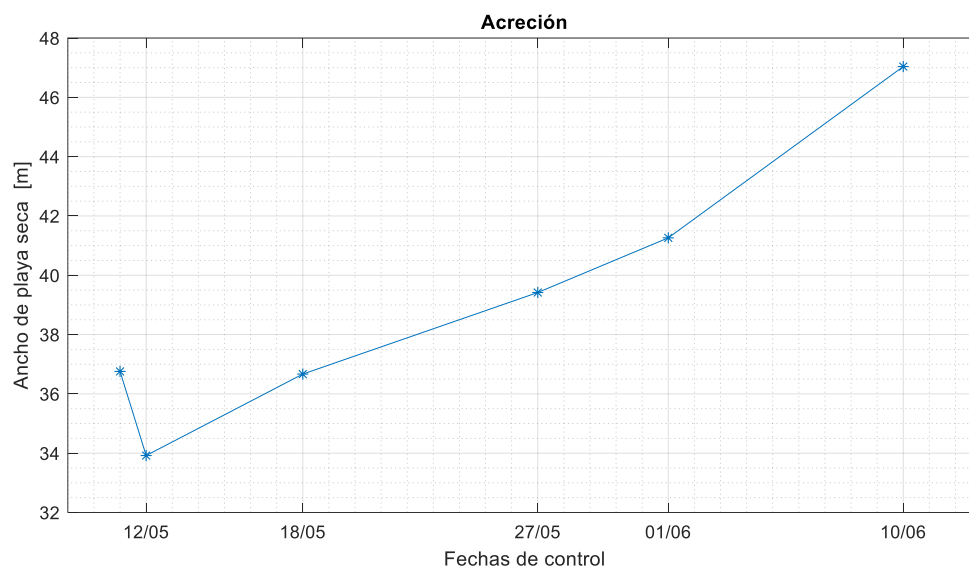


Figura 21. Gráfica de acreción (ancho de playa) al nivel de referencia de la pleamar para el perfil con scraping de la playa de Fuentebravia en las diferentes fechas de toma de datos.

Finalmente, en Fuentebravia para el perfil con scraping, el volumen de arena adicional en la recuperación, calculado desde donde se genera acreción es de $9.6\text{m}^2/\text{m}$ (ver Figura 22)

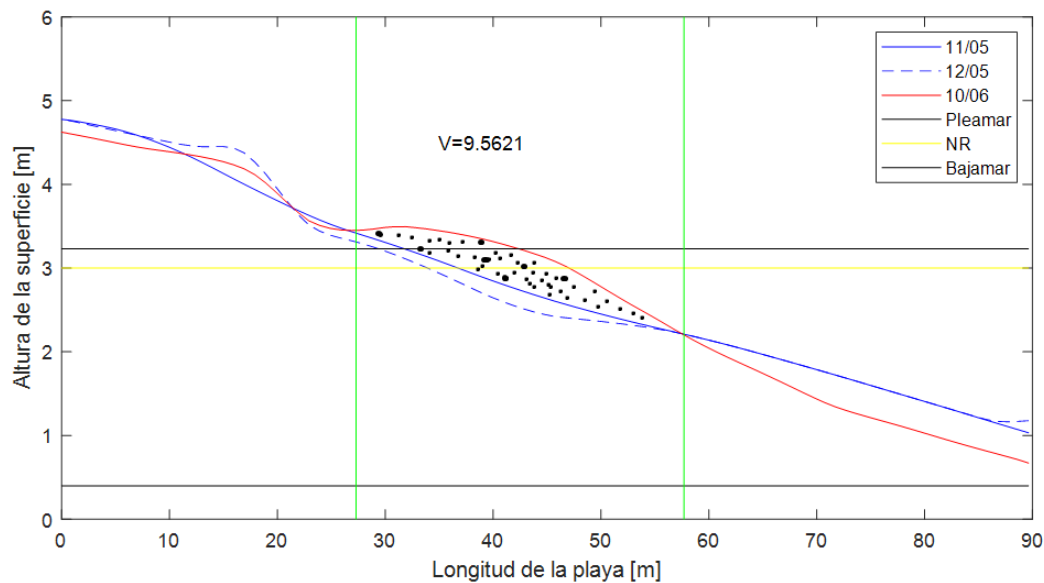


Figura 22. Representación gráfica del perfil inicial, modificado y final medido, con su respectiva zona de acreción y volumen respectivo. Perfil con scraping de la playa de Fuentebravía.

De lo anterior, el avance de playa es mucho mayor en la zona del scraping, lo cual comprueba la efectividad del método para lograr la recuperación de la playa. Con un avance de 5.6 m en el perfil natural, comparado con los 9.8 m en el perfil donde se realizó el scraping, con una acumulación 42.86% mayor en un mes de verano, con este método.

Ante algún temporal u oleaje en condiciones extremas, el perfil con scraping tiene el doble de material para poder mitigar los efectos erosivos del mismo, además de que se dispone de más ancho de playa seca para el turismo que es el objetivo principal de esta técnica.

A continuación, una tabla resumen con los valores de avance y aumento de volumen en cada uno de los perfiles de las dos playas de estudio.

Tabla 4. Resumen de los valores de avance en m y volumen de acreción para cada uno de los perfiles de estudio en Cádiz.

Playa	No. de perfil y tipo	Avance	Volumen
Fuentebravía	6: Natural (sin intervención)	5.6 m	5.7 m ³ / m
	4: Con perfilado asistido (scraping)	9.8 m	9.6 m ³ / m

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se concluye que el scraping funciona como método de recuperación o como medida de mitigación ante eventos extremos u exposición de oleaje energético. Al mismo tiempo de que el scraping no solo genera la recuperación de la playa, sino que en el mismo tramo de superficie es capaz de generar mayor acumulación de material. Con lo que, este método es efectivo para la conservación de playas y la preparación de las mismas para épocas de verano.

En las figuras 23 y 24, se realiza un ajuste lineal a las medidas tomadas en campo a partir de la segunda campaña (12 de mayo), el coeficiente de determinación, R^2 para cada una de las regresiones es de 0.9778 para el perfil natural y 0.9742 para el asistido bajo la modalidad de scraping, la bondad reflejada del ajuste para cada uno de los dos perfiles permite hacer un análisis seguro, por lo que de manera confiable es posible hablar de la tasa de acumulación en el mes de estudio.

De las regresiones, se calcula una pendiente de 0.2132 y 0.4298 para el perfil natural y asistido respectivamente, con una pendiente de el doble para el perfil con scraping se corrobora la acumulación tanto en volumen con el avance de este perfil respecto al natural. Por lo anterior, la tasa de acumulación diaria durante este mes, apunta al 50% más para la zona con perfilado mecánico.

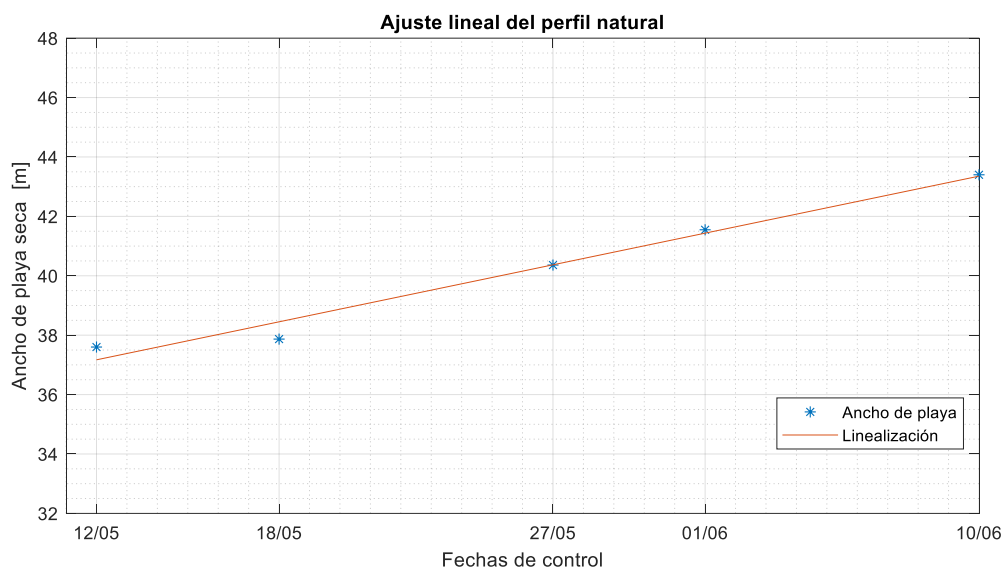


Figura 23. Regresión lineal del ancho de playa en función del tiempo para el perfil natural.

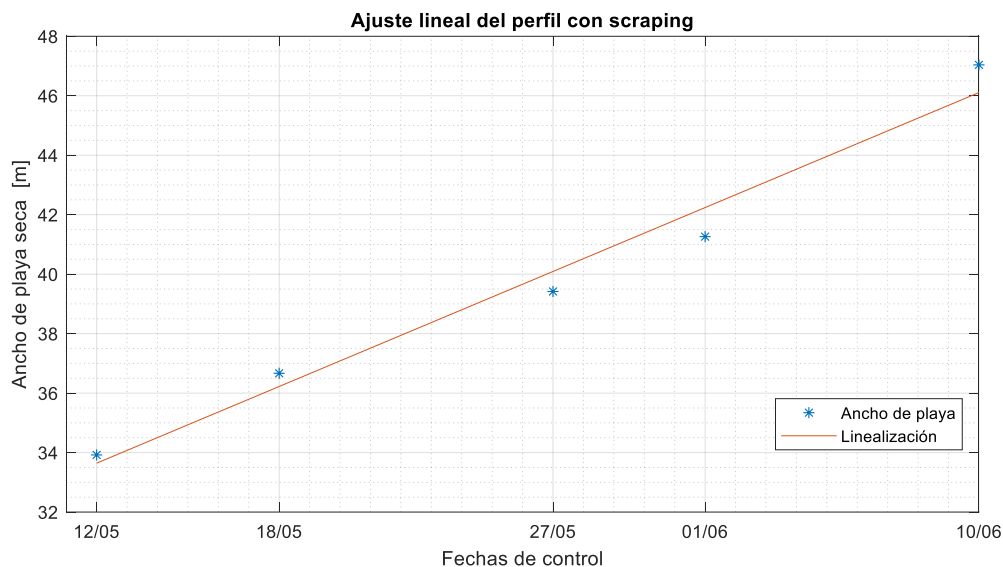


Figura 24. Regresión lineal del ancho de playa en función del tiempo para el perfil con scraping.

4.2. Ensayos de laboratorio

A continuación, se hacen dos análisis de los ensayos obtenidos en laboratorio, uno donde se evalúa el efecto del scraping sobre el perfil de acreción y el segundo, el efecto de la marea en el perfil de equilibrio.

Para cumplir con lo anterior, siguiendo la metodología descrita anteriormente para los ensayos de modelo físico en laboratorio, se simuló 3 configuraciones diferentes de marea y oleaje, y se analizó la evolución del perfil natural (influenciado únicamente por la marea y el oleaje) y el perfil modificado mediante la técnica de recuperación asistida scraping para cada una de ellas. Las configuraciones se muestran en la Tabla 5 y se recuerda que las variables son en escala de modelo como se explicó previamente en el apartado de la metodología (apartado: ensayos de laboratorio).

Tabla 5. Parámetros de oleaje para cada configuración de los ensayos ejecutados en laboratorio.

No. de configuración	Hs	Tp	Ω	Carrera de Marea
1	0.06	3	1.15	0.3 m
2	0.04	3	0.77	0.2 m
3	0.033	1.67	1.15	0.2 m

Para garantizar que las configuraciones elegidas generen acreción, es decir, que el estado de la playa sea reflejante, se calcula el rango de marea modal con la ecuación (6), este valor junto al parámetro adimensional de caída de grano nos da la caracterización morfológica del perfil (véase Tabla 6).

Tabla 6. Caracterización de estado morfodinámico de la playa según el rango de marea modal y al parámetro adimensional de caída de grano.

Configuración	M	Morfología de la playa
1	5: Macromareal	Reflejante
2	5: Macromareal	Reflejante
3	6.06: Macromareal	Reflejante

Una vez, generado los 6 ciclos de marea para cada configuración y realizado la respectiva medición de perfilado entre cada ciclo de marea ejecutado sobre los canales, se obtuvo:

- **Para el canal de evolución natural:**

Evolución de perfil

En las Figuras 25, 26 y 27 se muestran los perfiles obtenidos al finalizar cada ensayo, la línea negra es el perfil inicial antes de ejecutar el primer ciclo de marea de calma y resultado del último ciclo de temporal entendiéndose como perfil de invierno. Posterior a estos, se presentan las morfologías respectivas a cada marea. De las 6 mareas ejecutadas se muestran los perfiles obtenidos por la marea 1 y 2 ya que fue donde hubo mayores cambios en el perfil, posteriormente el 4 y 6 para controlar la evolución del mismo.

En las tres configuraciones implementadas en la ejecución de los ensayos para el canal natural, se evidencia un comportamiento similar, donde en los primeros ciclos de marea (1 y 2) hay acumulación de material en la berma generándose acreción. Se destaca que para todas las configuraciones la velocidad de acumulación es mayor en los primeros ciclos que en los últimos, disminuyendo la magnitud del material movilizado entre ciclos conforme aumentaban la cantidad de ejecuciones totales.

Se entiende que, ante la ausencia de cambios significativos en las últimas ejecuciones de marea, finalmente, hay una aproximación al perfil de equilibrio de verano.

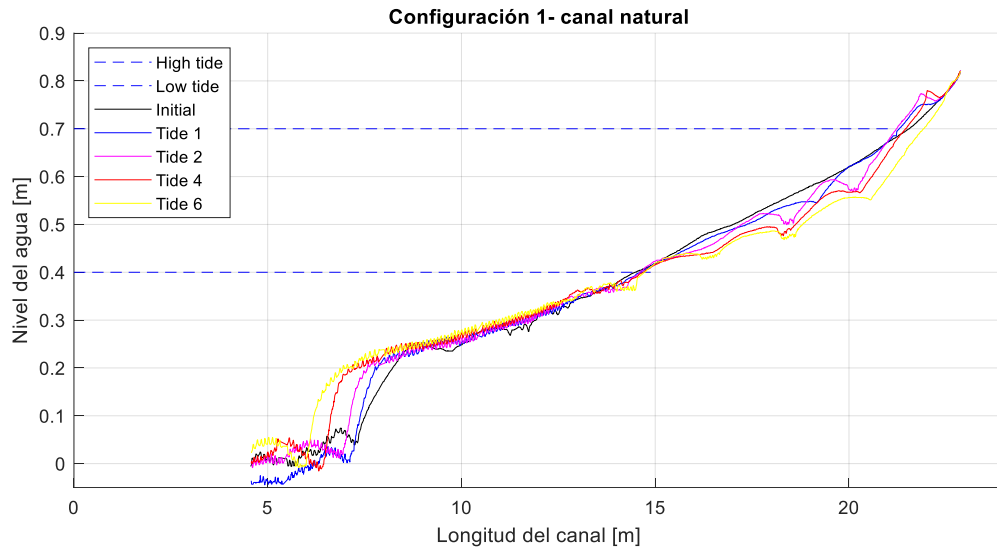


Figura 25. Evolución del perfil en la configuración 1 de los ensayos de laboratorio para el canal natural.

Para la configuración 1, con una carrera de marea de 0.3 m y un oleaje con H_s y T_p de 0.06 m y 3 s respectivamente, a la altura de pleamar ante el primer y segundo ciclo de marea ejecutado se desarrolla una pequeña berma de 7 cm de altura y un avance de 8 cm, simultaneo a la erosión en la zona intermareal, sin embargo, posterior al ciclo de marea 3 se genera erosión y la berma de acumulación se pierde, para el último ciclo de marea hay un retroceso de 50 cm al nivel de la pleamar y de más de un metro en la zona céntrica de la intermareal (ver Figura 25).

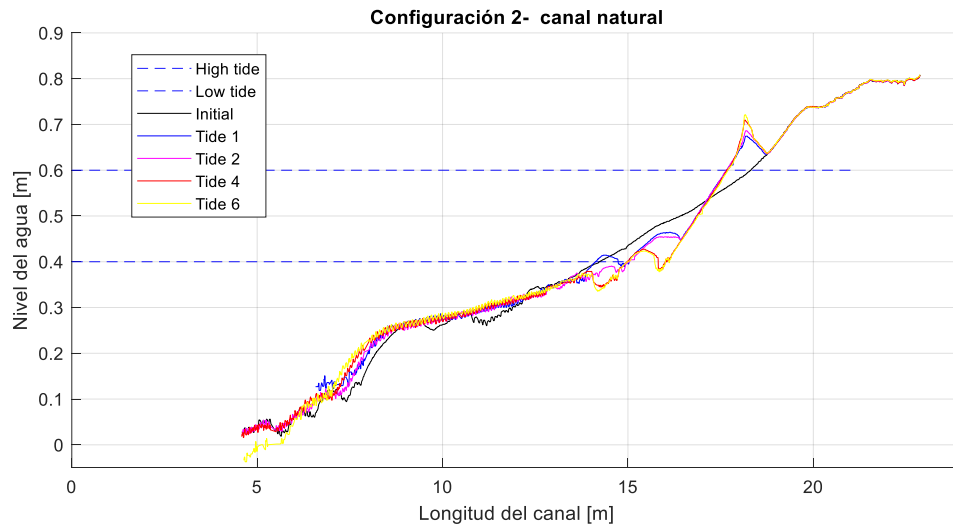


Figura 26. Evolución del perfil en la configuración 2 de los ensayos de laboratorio para el canal natural.

Para la configuración 2, al disminuir la carrera de marea a 0.2 m, la H_s a 0.04 m y conservar el T_p de 3 s, se aprecia en el nivel de la pleamar un avance de la playa de aproximadamente 1 m al nivel de pleamar, la berma generada no presenta variación longitudinal desde el primer ciclo de marea ejecutado, pero si continúa creciendo en altura. En la zona intermareal, se observa erosión hasta el ciclo de marea No.4, a partir de este punto la movilización de la granalla hacia el interior del perfil se estabiliza, con que se puede afirmar que ha llegado a su perfil de equilibrio.

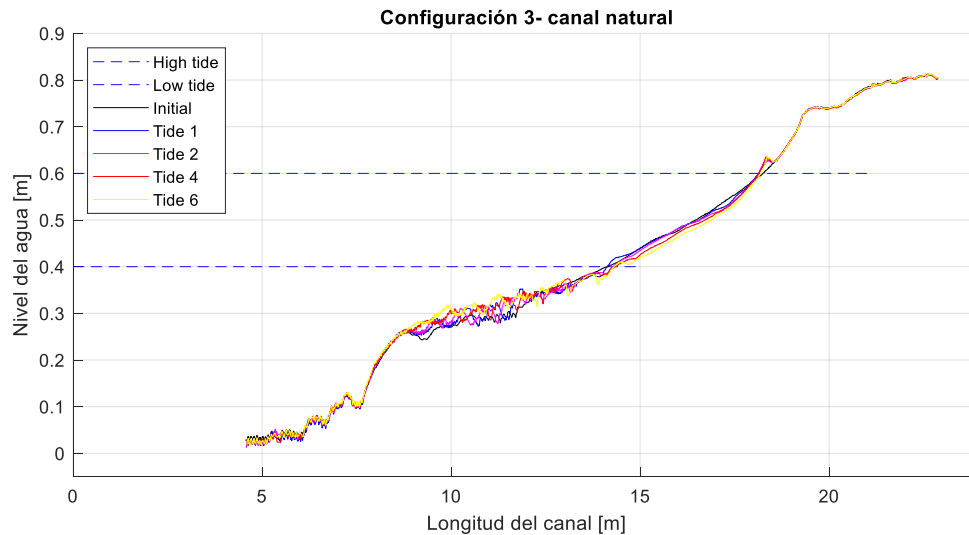


Figura 27. Evolución del perfil en la configuración 3 de los ensayos de laboratorio para el canal natural.

En cuanto a la configuración 3, se mantiene la carrera de marea de 0.2 m, pero se modifican los parámetros del oleaje, disminuyendo H_s y T_p a 0.033 m y 1.67 s respectivamente, en este caso la evolución del perfil ante cada ciclo de marea ejecutado es a una tasa muy inferior que en los anteriores casos, sin embargo, se logra apreciar que desde el primer ciclo al igual que en la configuración 1 y 2 hay ganancia de playa a la altura de la pleamar, para esta configuración el avance fue de 5 cm, simultaneo a la erosión en la zona intermareal. La magnitud de la erosión es pequeña, pero es correspondiente al pequeño volumen de material acumulado en la berma de playa.

Una vez visualizados con mayor detalle los perfiles obtenidos y su evolución se puede llegar a afirmar que, aunque no son los mismos perfiles, la forma resultante si es la misma para cada configuración. Se recuerda que el tamaño de grano es igual para todos los perfiles, al mismo tiempo que la forma y pendiente del perfil inicial.

Perfil de equilibrio (verano)

A partir de los perfiles finales obtenidos después de 6 ciclos de marea, se procede a realizar el ajuste al perfil teórico de Dean para cada una de las configuraciones (ver ilustraciones 28, 29 y 30).

Para el ajuste es necesario conocer la profundidad de cierre, ésta es válida para los ensayos ejecutados de manera natural y con scraping (puesto que están afectados por las mismas dinámicas) y diferente para cada una de las configuraciones ya que esta depende de la altura de ola significativa y el periodo pico de cada ensayo. Este parámetro nos indica hasta que profundidad se presentaron cambios, por lo que es importante para determinar el punto final del ajuste. Los valores de h^* hallados fueron:

Tabla 7. Profundidad de cierre para cada configuración de laboratorio.

Configuración	h^* [m]
1	0.0986
2	0.0639
3	0.0543

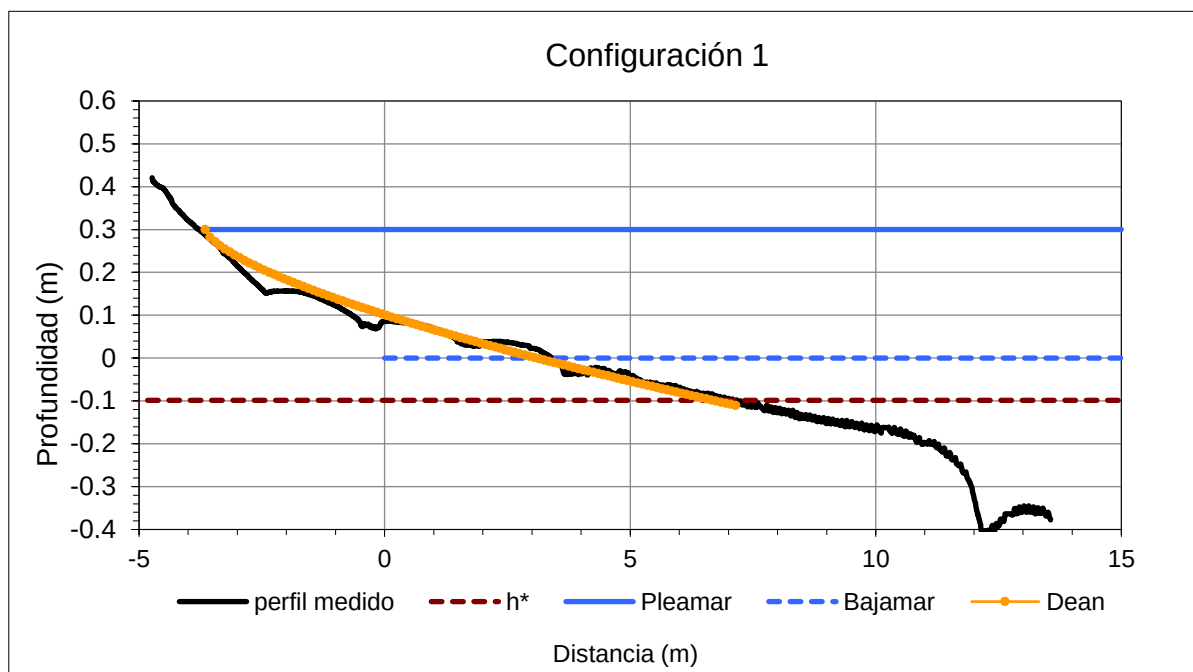


Figura 28. Perfil de equilibrio de la configuración 1 del canal natural, ajustado al perfil teórico de Dean.

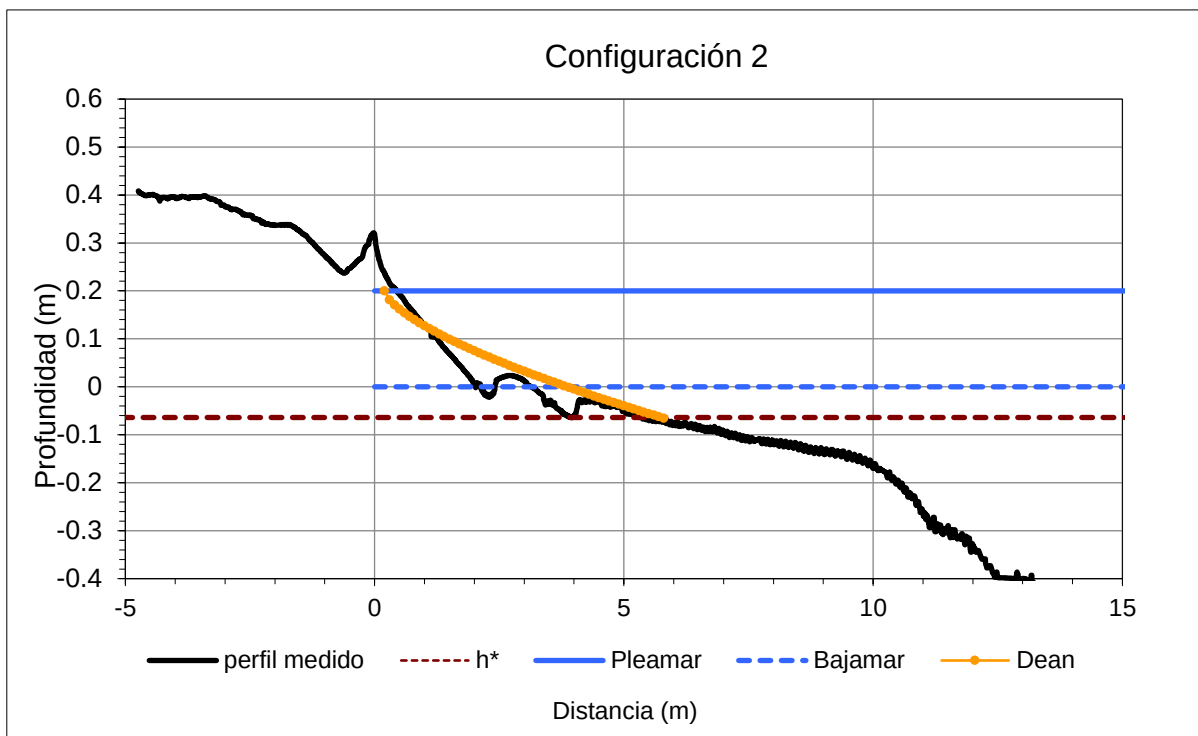


Figura 29. Perfil de equilibrio de la configuración 2 del canal natural, ajustado al perfil teórico de Dean.

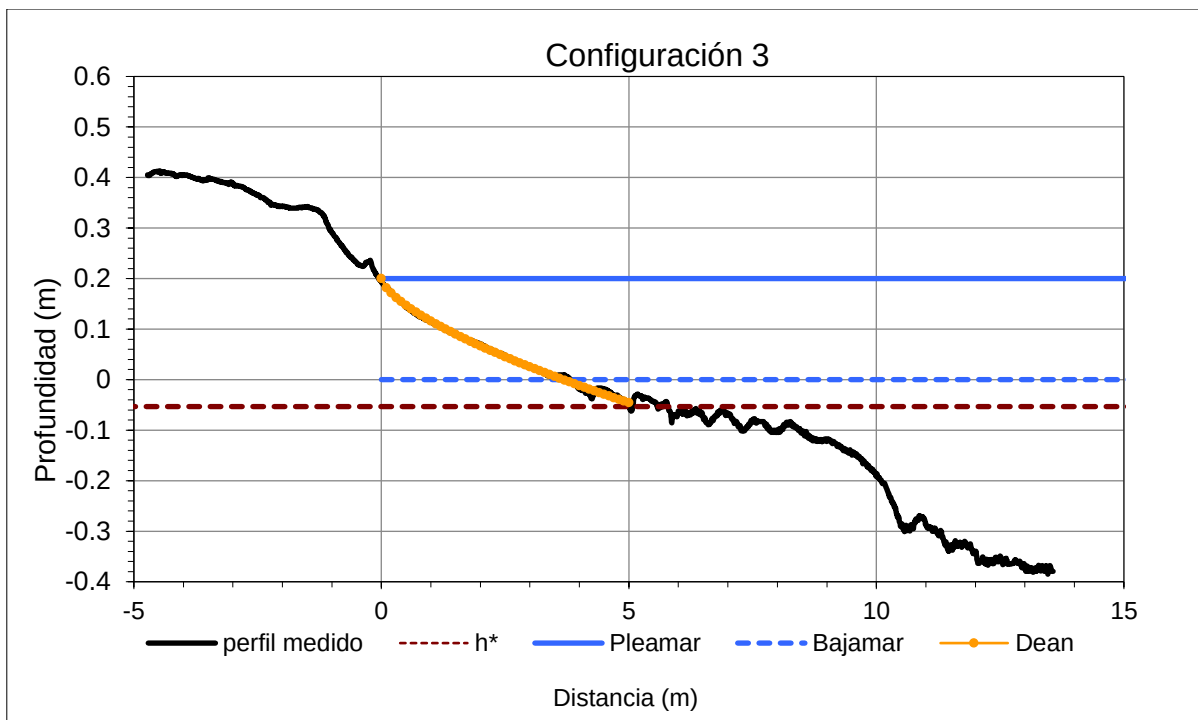


Figura 30. Perfil de equilibrio de la configuración 3 del canal natural, ajustado al perfil teórico de Dean.

El perfil de Dean ajustado para las tres configuraciones en el canal natural, da como resultado el mismo valor, dando a entender que la condición de equilibrio del canal natural del laboratorio, independientemente del oleaje y la carrera de marea, para un D50 de 0.32 mm se puede simplificar en la siguiente ecuación.

$$A = 0.5 * 0.0174^{0.44}$$

Por tanto, el perfil de playa en laboratorio se ajusta con un valor:

$$k = 0.5 \text{ y } A = 0.084 \text{ m}^{2/3}$$

Como la escala geométrica horizontal del perfil es la misma a la vertical, se conserva la misma forma en el prototipo que en el modelo (se multiplica por 9 en ambas escalas), por lo tanto, el A de Dean del modelo es el mismo que el prototipo. Teniendo en cuenta que la ecuación de la A de Dean sólo depende de la velocidad de caída de grano se puede entonces obtener la K que se habría calculado para el prototipo; con w en prototipo igual a 0.0263 m/s se tiene entonces K de 0.416 para el prototipo.

- **Canal asistido mecánicamente con scraping:**

Evolución de perfil

Al igual que en el canal natural, en las siguientes imágenes (31, 32 y 33) se muestra el perfil de invierno obtenido tras la ejecución de temporales en el laboratorio que se tomó como perfil inicial para la ejecución de las mareas de calmas, al mismo tiempo que los perfiles obtenidos tras la finalización de cada ciclo de marea.

Se visualiza como el perfil inicial cuenta con una “zanja o hueco” cercano a la altura de bajamar, al mismo tiempo, de una berma más amplia a la altura de pleamar, a esto se le identifica como la acción de scraping, la zona de préstamo tiene 1.5 m en modelo y 13 m en prototipo y una profundidad de 0.03 m en modelo y 0.27 m en prototipo (profundidad de la zanja). En cuanto a la zona de vertido la playa se amplió aproximadamente 1 metro en la cota de 0.75 m. Este procedimiento es parecido al movimiento de arena realizado en Cádiz y medido en los datos de campo.

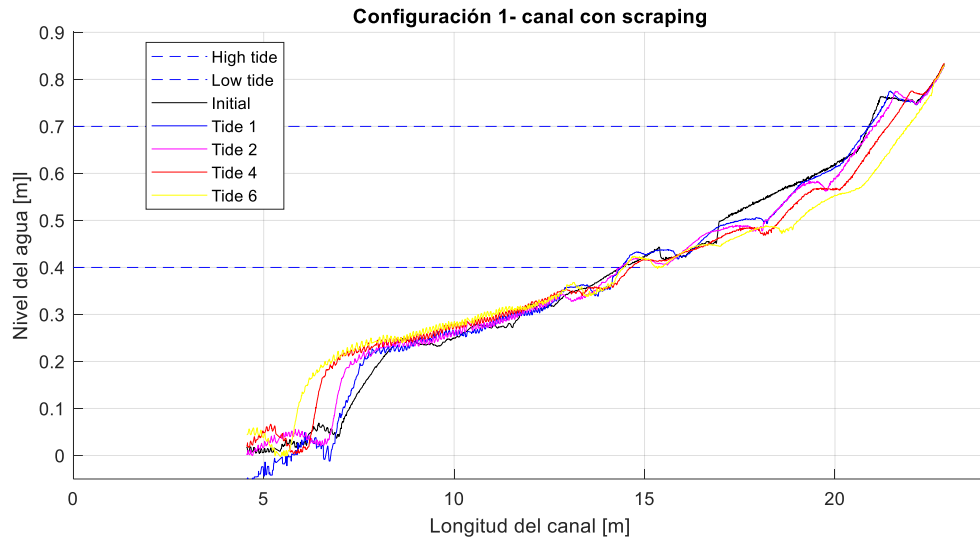


Figura 31. Evolución del perfil en la configuración 1 de los ensayos de laboratorio para el canal con scraping.

Ante los parámetros de la configuración 1, en el perfil con scraping, al igual que en el perfil natural, hay erosión tanto en la berma como en la zona intermareal, numéricamente a la altura de pleamar el retroceso de la playa fue de 1 m, lo cual indica que con carrera de marea de 0.3 m la berma se erosiona y el vertido realizado no es estable.

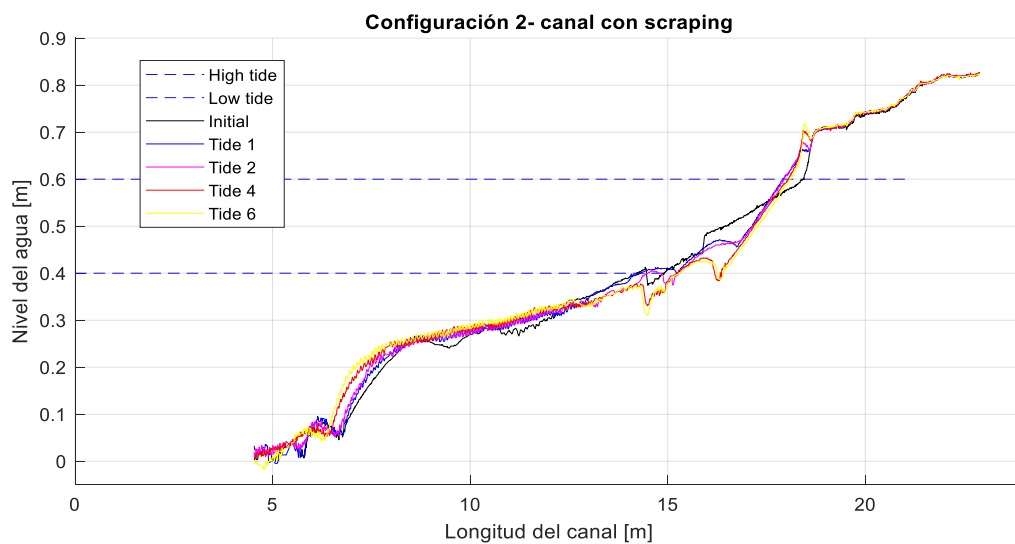


Figura 32. Evolución del perfil en la configuración 2 de los ensayos de laboratorio para el canal con scraping.

En cuanto la configuración 2, se genera al nivel de la pleamar un avance de 1 m adicional, es decir, a partir del punto donde anteriormente ya se había vertido arena de manera manual siguió acumulándose material. La mayor acumulación se presenta tras el primer ciclo de marea, sin embargo, esta acumulación se conserva en los siguientes ciclos del ensayo, indicando estabilización en la berma de playa, por otro lado, en la zona intermareal, hay erosión. Un metro más de lo que se estaba

Un detalle a ser tenido en cuenta, y no menos importante de la configuración 2, es que en la zona intermareal aparecieron formas rítmicas en forma de barras paralelas a la costa cuyos senos se profundizaron hasta el ciclo de marea No. 4, a partir del ciclo No.5 se observó la estabilización del perfil (ver evolución en la Figura 32). Estas formas podrían deberse a efectos de la escala debidos simulación en laboratorio ya los perfiles están confinados por paredes laterales con un espaciamiento de solo 0.9 m entre ellas.

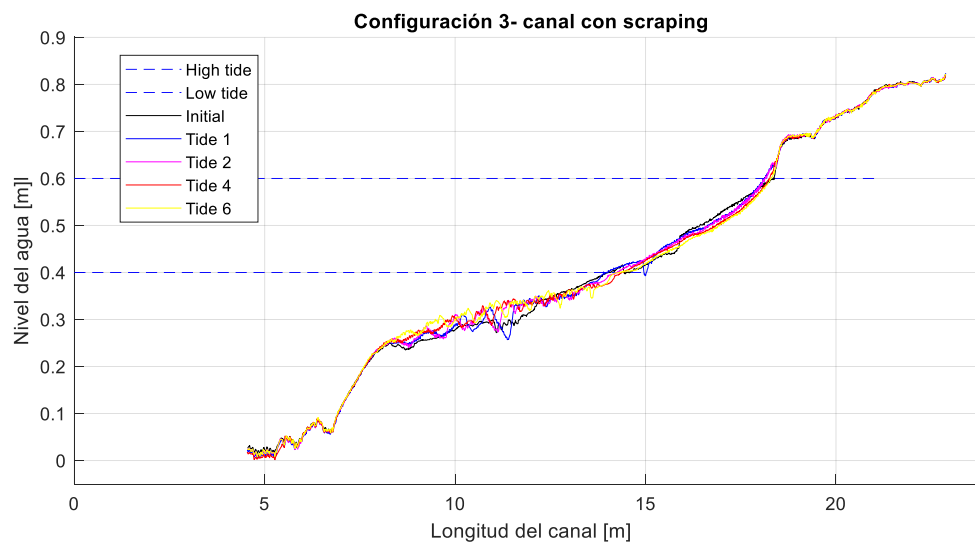


Figura 33. Evolución del perfil en la configuración 3 de los ensayos de laboratorio para el canal con scraping.

Finalmente, la configuración 3 muestra resultados muy parecidos al perfil natural, a la altura de la pleamar, en la berma, no hay cambios significativos (y que a la altura de pleamar se observa un avance de únicamente 20 cm), conservándose casi intacta, mientras que, en la zona intermareal, se observa un poco de erosión entre ciclos. Cabe resaltar que en el perfil natural se produce la misma magnitud en el avance la playa.

Es posible determinar en los perfiles con scraping que hay similitud en la evolución de las configuraciones 2 y 3 en la zona sumergida, habiendo erosión tras los primeros ciclos de marea ejecutados y estabilizándose a partir del cuarto ciclo. Por otro lado, en la zona de la berma para las mismas configuraciones (a diferencia de la 1), el material presente se conserva y adicionalmente genera acreción, con lo cual se puede afirmar que la carrera de marea es un factor determinante en la evolución del perfil, que para el caso es de 0.3 m en la configuración 1, es decir, 0.1 m superior a las otras dos configuraciones.

Lamentablemente, debido a que la acreción ocurre en solo 2 ciclos de marea no hay resolución temporal suficiente para comparar las velocidades de acreción hasta la condición de equilibrio, entre el perfil natural y el perfil con el scraping. Aspecto que se debe tener en cuenta en futuros ensayos, dado que se requiere verificar si el scraping acelera el proceso de acreción, obteniéndose al final “del verano” una forma del perfil de playa similar, como se verá a continuación.

Perfil de equilibrio (verano)

Por otro lado, reafirmando que las geometrías finales en la zona intermareal son casi iguales, y el movimiento entre las mareas 4 y 6 es mínimo se entiende que hay cercanía u aproximación al perfil de equilibrio, para corroborar la similitud entre las configuraciones se vuelve a realizar el ajuste de los perfiles al perfil teórico de Dean (ver Figuras 34, 35 y 36).

Se recuerda que las profundidades de cierre fueron mostradas anteriormente y que son diferentes entre configuraciones (ver Tabla 7).

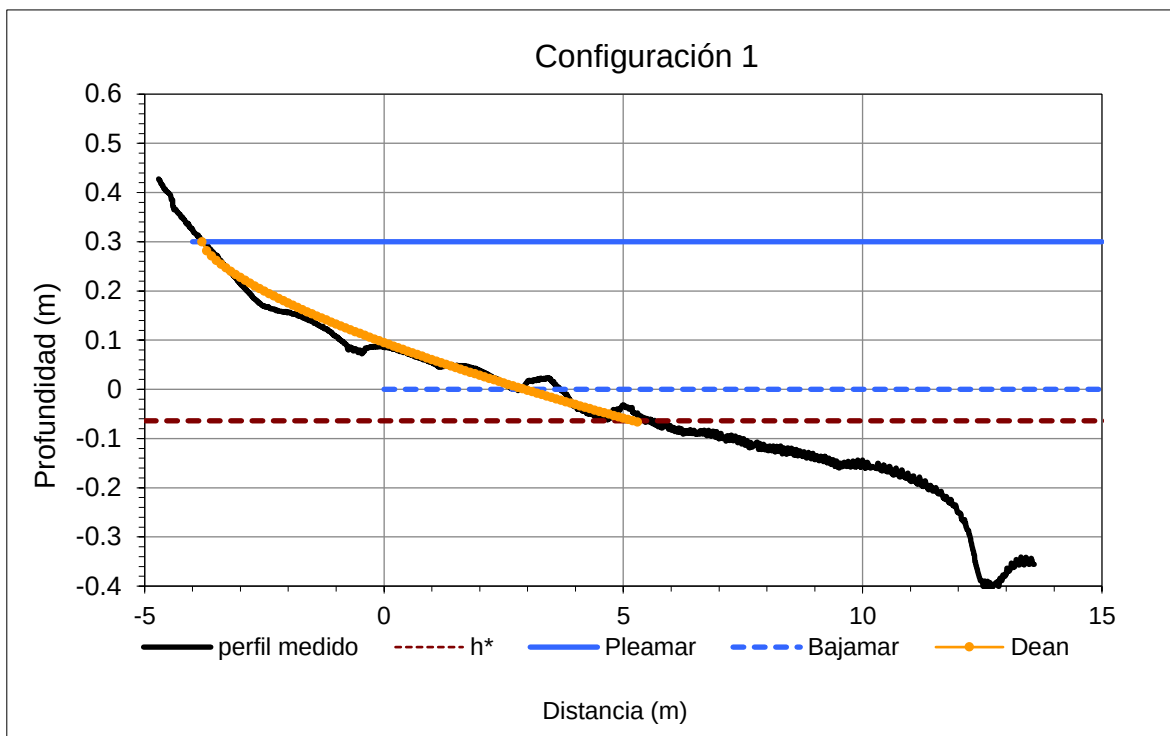


Figura 34. Perfil de equilibrio de la configuración 1 del canal con scraping, ajustado al perfil teórico de Dean.

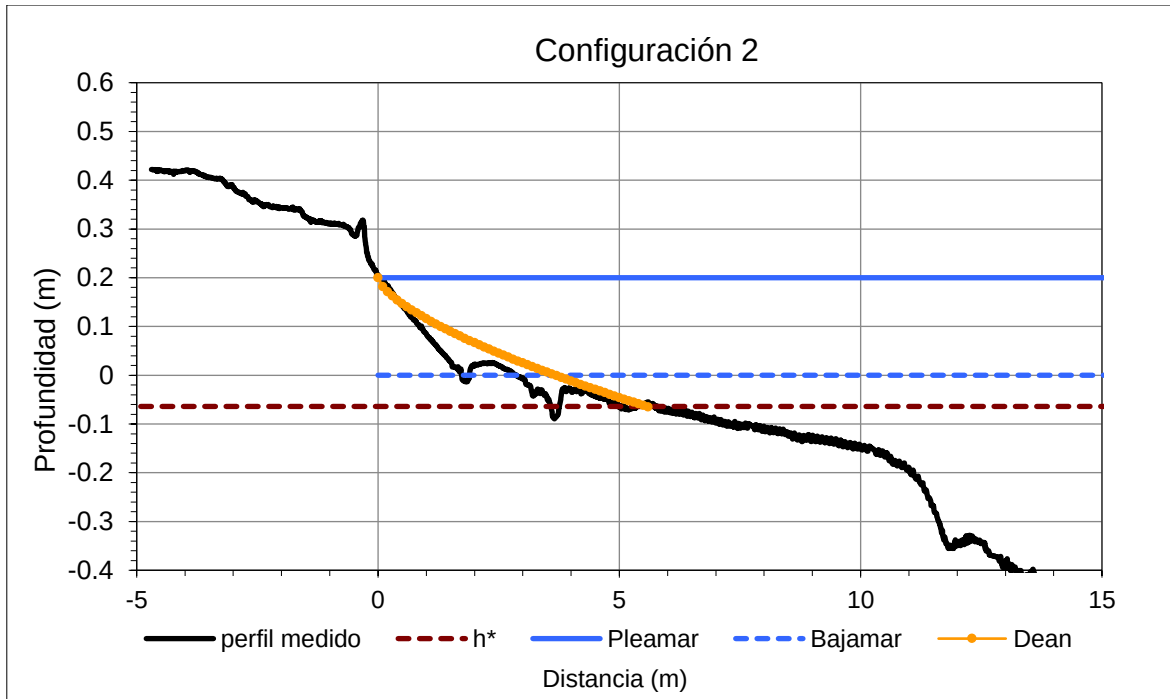


Figura 35. Perfil de equilibrio de la configuración 2 del canal con scraping, ajustado al perfil teórico de Dean.

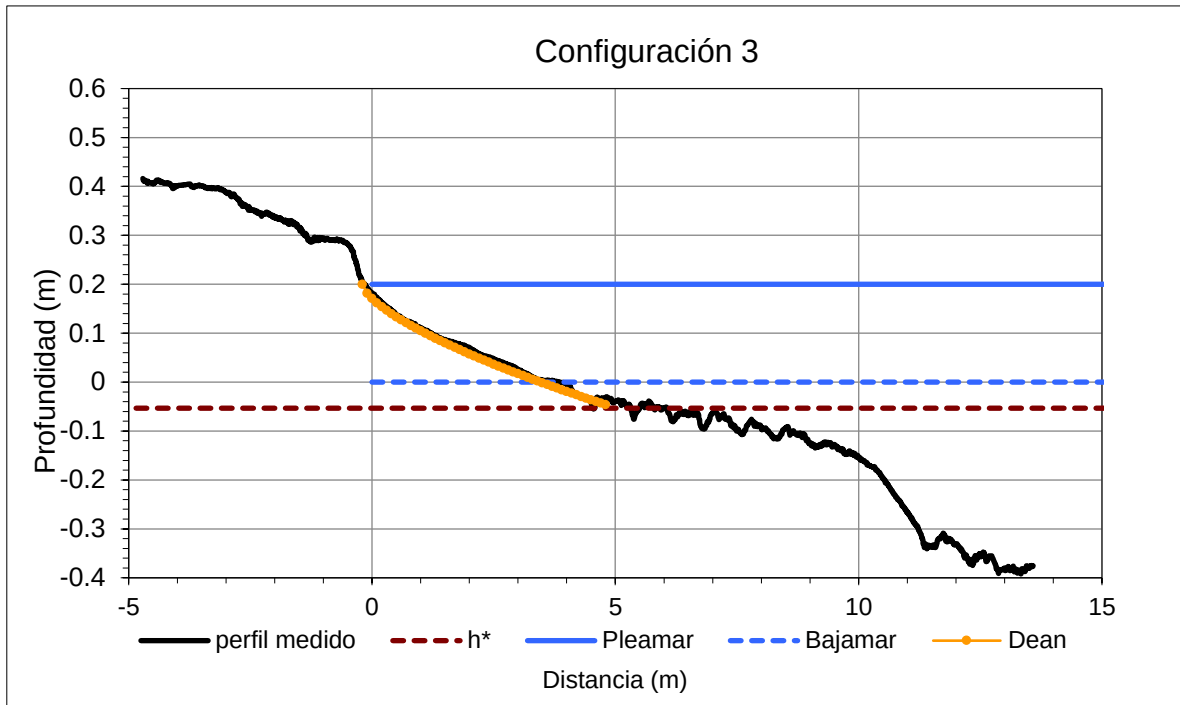


Figura 36. Perfil de equilibrio de la configuración 3 del canal con scraping, ajustado al perfil teórico de Dean.

El perfil de Dean ajustado para las tres configuraciones en el canal con scraping, al igual que en el natural arroja el mismo valor para cada una de ellas, conservándose la misma A de Dean hallada previamente.

$$A = 0.5 * 0.0174^{0.44}$$

Con ambos valores (A de Dean para canal natural y con scraping) es posible afirmar que el perfil de equilibrio final es el mismo para las diferentes configuraciones, sin embargo, cabe resaltar que no es clara la evolución de los mismos en función del tiempo puesto que los principales cambios se dan entre el ciclo de calma 1 y 2 consiguiendo estabilizarse en 6 ciclos de marea. Cabe destacar, que, aunque hubo erosión en la configuración 1, la forma del perfil se conservó para cada ciclo de marea, es decir, hubo retroceso paralelo a sí mismo.

A continuación, se muestra una tabla comparativa del ancho de playa seca final en los diferentes canales para cada una de las configuraciones llevadas a cabo en el laboratorio, teniendo en cuenta que todos los perfiles empiezan en el mismo punto, esta medida es confiable para observar el comportamiento de avance y analizar la efectividad del scraping sobre los perfiles del laboratorio.

Tabla 8. Ancho de playa para cada configuración, visualización de avance.

Configuración	Ancho de playa final	
	Canal natural	Canal asistido
1	1.5 m	1.5 m
2	6.1 m	6.2 m
3	6.1 m	6.3 m

De la anterior tabla, se puede decir que: para la configuración 1 la carrera de marea de 0.3 generó inestabilidad por lo que el vertido se erosionó hasta llegar al mismo punto del perfil natural; para las configuraciones 2 y 3, el avance final de la playa fue parecido, sin embargo, como el perfil con el scraping ya tenía la playa más ancha hay ventaja de este sobre el natural en el ancho final.

La acreción producida en el perfil natural también se ha producido en los perfiles con scraping, uniéndose a la pequeña berma que se forma sobre la pleamar, delante de la zona de vertido.

Finalmente, en cuanto a los datos obtenidos de laboratorio y por lo expuesto en todo el apartado se puede afirmar que el scraping permite tener una playa seca más ancha desde el inicio de los ensayos hasta el final, consiguiendo una forma del perfil de equilibrio similar. Parece ser que el desequilibrio que genera el scraping, incrementa la tasa de transporte de arena hacia tierra.

5. Conclusiones

- Se ha observado de forma preliminar a partir de ensayos de laboratorio y mediciones en campo, que el comportamiento del perfil de playa bajo condiciones de acreción, en mares con marea, presenta mayor acumulación de arena en la línea de costa aplicando una técnica asistida mecánicamente como el scraping, en comparación con el proceso natural de acreción. No obstante, esto tiene que ser verificado con más datos de campo y laboratorio, teniendo un mayor espectro de condiciones dinámicas y sedimentarias.
- Aunque el scraping genera un mayor ancho de la playa seca, la forma final del perfil de equilibrio de “verano” es la misma que consigue el perfil natural, lo que significa que posiblemente el desequilibrio inicial del scraping genera una tasa de transporte de arena mayor hacia tierra, y posiblemente a una velocidad mayor de acumulación en la parte alta del perfil, sin embargo esto último no se ha podido comprobar debido a que la acreción ocurre en solo 2 ciclos de marea no hay resolución temporal suficiente para comparar las velocidades de acreción hasta la condición de equilibrio, entre el perfil natural y el perfil con el scraping
- Tanto las campañas de campo como en los ensayos de laboratorio muestran una tendencia similar en la forma en que se desarrolla la acreción, el proceso de acumulación inicialmente aumenta el ancho de la berma de playa, sin embargo, a partir de un punto específico, la acreción no muestra un avance de la línea de costa, sino que aumenta la altura de la berma.
- En todos los casos simulados el perfil de equilibrio de “verano”, con rango de marea modal superior a 4, se representa bastante bien con el perfil de Dean. El parámetro de forma del perfil de Dean (A), obtenido para el perfil de equilibrio tanto en perfil natural como asistido, es el mismo, por lo tanto, teniendo en cuenta que el sedimento es igual para todas las configuraciones, el parámetro K también es constante.
- La experiencia en el laboratorio de ensayos con fondo móvil, donde esta alumna ha participado desde cero, comenzando con el diseño, el montaje del modelo, la ejecución, procesamiento y análisis de datos, ha sido muy enriquecedor para esta alumna, la cual espera transferir esta experiencia a su país de origen.

- Con este trabajo de fin de master, la alumna considera que ha cumplido con los requerimientos formativos que exige el master de Costas y Puertos (CyP).

6. Bibliografía

Bernabeu Tello, A. M. (1999): Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas. Tesis doctoral, Univ. de Cantabria, 170 p.

Birkemeier, W. A., DeWall, A. E., Gorbics, C., and Miller, H. C. (1981): "User's Guide to CERC's Field Research Facility," MR 81-7, U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir,

Bruun, P. (1954): Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board, Technical Memorandum, No 44, 75 p

Bruun, P. (1983): Beach scraping. Coastal Engineering, 7, 167–173

Byron Shire Council (2010): Foreshore Management Works (Beach Scraping) New Brighton beach.

Dean, R.G. (1977): Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Ocean Engineering Report No 12, University of Delaware, 45 p.

Dean, R. G. (1987): Coastal sediment processes: Toward engineering solutions. En: Proceedings of Coastal Sediments '87: 1-24

González Rodríguez, E. M. (1995): Morfología de playas en equilibrio, playa y perfil. Tesis doctoral, Univ. de Cantabria, 270 p.

González, M., Medina, R., Losada, M., (2010): On the design of beach nourishment projects using static equilibrium concepts: Application to the Spanish coast. Coast. Eng. 57, 227–240.

Herrington, T.O., (1994): A laboratory investigation of beach scraping techniques. technical report. SIT-DL - 94 - 9 -2712. Department of Environmental Protection, Bureau of Coastal Regulation, New Jersey. 36P

Ibarra,A; Belmonte, F. (2017). Comprendiendo el litoral: Dinámica y procesos. Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones.

Kratzmann, M.G., Hapke, C.J., (2008): anthropogenic influences on the dune/beach morphology of a moderately developed barrier island: Fire Island, New York, National Park Service Technical Report NPS/NER/NRTR—2008/131, 36 P.

Larson, M. (1991): Equilibrium profile of a beach with varying grain size. En: Proceedings of Coastal Sediments'91: 905- 919.

Merlotto, A; Bértola, G. (2008): Evolución urbana y su influencia en la erosión costera en el balneario parque mar chiquita, argentina Papeles de Geografía, núm. 47-48, enero-diciembre, pp. 143-158.Universidad de Murcia Murcia, España

Monge-Ganuzas, M., Gainza, J., Liria, P., Epelde, I., Uriarte, A., Garnier, R., González, M., Nuñez, P., Jaramillo, C., Medina, R., (2017): Morphodynamic evolution of Laida beach (Oka estuary, Urdaibai Biosphere Reserve, southeastern Bay of Biscay) in response to supratidal beach nourishment actions. J. Sea Res. 130, 85–95.

Smith, S., Harrison, M, Rowland, J., Fitzgibbon, B. (2011): Assessing the impacts of beach scraping on the macroinvertebrates of New Brighton beach, Northern NSW.

Soulsby, RL (1997). Dinámica de las arenas marinas: un manual para aplicaciones prácticas. Thomas Telford, Londres, ISBN 0-7277-2584-X.

