UNIVERSIDAD DE CÁDIZ
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA POROSIDAD DE LA ARENA TRAS UNA REGENERACIÓN DE PLAYA

Jorge Román Sierra
Cádiz, 2014

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA POROSIDAD DE LA ARENA TRAS UNA REGENERACIÓN DE PLAYA

Memoria presentada por D. Jorge Román Sierra para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

Fdo. D. Jorge Román Sierra

Los Directores de la tesis:

Fdo. Dr. D. Juan José Muñoz Pérez
Profesor Titular
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cádiz

Fdo. Dra. Dña. Marina Navarro Pons
Investigadora Doctora
Departamento de Física Aplicada
Universidad de Cádiz

D. JUAN JOSÉ MUÑOZ PÉREZ, Profesor Titular del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Cádiz, y Dña. MARINA NAVARRO PONS, Investigadora del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Cádiz,

HACEN CONSTAR:

Que esta memoria, titulada **"Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena tras una regeneración de playa"** y presentada por D. Jorge Román Sierra, resume su trabajo de Tesis Doctoral, habiendo sido dirigida por los abajo firmantes. Considerando que reúne todos los requisitos legales, autorizamos su presentación y defensa para optar al grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

Cádiz, Febrero de 2014

Fdo. Dr. D. Juan José Muñoz Pérez Fdo. Dra. Dña. Marina Navarro Pons

AGRADECIMIENTOS

¡Ultreia! Es el fin del Camino, el fin de la Tesis. Ha resultado ser un largo y complejo recorrido, pero por mucho esfuerzo y dedicación empleados, nunca me he sentido solo. Esta aventura comenzó allá por el año 2008, tiempo en que compaginaba mi trabajo en la Demarcación de Costas con la ardua tarea del investigador en mi tiempo libre. Por entonces, más que en realizar una Tesis, pensaba en investigar y publicar los hallazgos en algún medio de divulgación científica. Pese a no ser generalmente una labor muy reconocida, dígase también provechosa o lucrativa, a mi parecer sí la considero fructuosa. El valor de aportar este granito de arena al conocimiento científico me basta para apreciar todo el trabajo y entusiasmo invertidos, no sólo por mí, sino por los que me rodean y han convivido con el desarrollo de esta Tesis.

Aunque la lista de personas que me han apoyado y soportado a lo largo de esta andanza podría ser numerosa, no es mi intención aburrir con agradecimientos infinitos. Es por ello que si alguien no se encuentra entre estas líneas, le pido anticipadamente disculpas. Esta memoria lleva un trocito anónimo de cada una de las personas que me ayudaron en el inicio, desarrollo y desenlace de este trabajo. Está dedicada también a ello/as.

Como primera evocación viene a mi cabeza agradecer el esfuerzo de mis padres por darme una excelente educación y enseñarme a valorar el Saber como un bien que no ocupa lugar, al que todas las personas deberían tener acceso. A mi Madre por haber luchado tanto por mí, especialmente de recién nacido y posteriormente de niño. Si hoy estoy aquí escribiendo estas líneas, es por ti. Nunca podré devolverte todo el cariño y el amor que me distes entonces y sientes ahora por mí.

Marina, qué podría escribir que compensara todos los momentos que estos trozos de papel han substraído de nuestra vida. Has sido el mástil de nuestra nave, mi columna de apoyo y alivio, mi confesionario, mi paño de lágrimas, mi refugio. Nada sin ti habría tenido sentido. Deseo agradecerte tu adorable compañía y sobre todo el habernos dado lo que más quiero en el mundo, nuestra pequeña Leire. Nunca imaginé cómo sería la felicidad, ahora lo sé. Asimismo, gracias por ayudarme con tu experiencia profesional en todo el desarrollo de este cometido. Gran parte de este trabajo se debe a tu perseverancia y buenos consejos. A mi entender, has sido una magnífica co-directora de Tesis.

Deseo agradecer a mi hermano César el haber compartido conmigo este Camino de una manera muy especial. Siempre dispuesto a ayudarme en cuanto se lo pedía. Siempre ha

estado interesado por la ciencia que realizaba, pues además de ser un excelente historiador, es una extraordinaria persona, culta e inteligente.

Ha habido días-temporadas donde no veía el final, donde la luz se apagaba y no parecía alcanzar la otra orilla. Momentos en los que un barco a la deriva precisa de un firme referente, de un faro que le indique la demora. Esta Tesis Doctoral va dedicada muy especialmente al Director, a Juan José Muñoz Pérez, quien desde el año 2003 me enseñó a apreciar el mundo de la investigación y conocer sus dichas y desventuras. Tu profesionalidad, saber estar y valor personal han sido excelentes. Gracias por tu dedicación, paciencia y esfuerzo, pero sobre todo, por brindarme tu amistad.

¿Cómo no podría tener una inmensa gratitud por los compañeros y buenos amigos de la Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico en Cádiz? El agradecimiento es inmenso para todos ellos por su apoyo y comprensión durante la toma de datos. Sin ellos, este trabajo no habría podido llevarse a cabo. Gracias a todos, especialmente a Gregorio, Ángel, Lorenzo, Jose Miguel, Alfredo, Ana, Juan Manuel Abarca, Sebastián, Alberto, Jose Luís Reyes, Félix, Manolo, Higinio, Paco, Juan Quevedo, Marta, Andrés, Carmen, Kiko, Cabanillas, Adela, hermanos Lacave y de Juan de Dios de quien guardo un grato recuerdo. También a los alumnos en prácticas que trabajaron como uno más en la Demarcación y me profesaron su amistad, ayudando en la toma de datos a la hora que fuera, hiciera el tiempo que hiciera. Perdonadme los que no aparecéis, sois igualmente partícipes. Deseo agradecer muy cariñosamente este trabajo a dos grandes personas que me enseñaron su profesión y me trataron como a un hijo desde que pisé la Demarcación. Lamentablemente ya no están entre nosotros, pero sí en mi corazón; Alejo y Antonio Pérez, gracias.

Quisiera también agradecer a mis compañeros de la Universidad de Cádiz, quién me han ayudado a sobrellevar el trabajo con su agradable compañía y amistad. Gracias a Giorgio, Antonio Ruiz, Jose Juán, Melquiades, Julio, Pilar, Irene, Jeanette, Isa, y especialmente a Juanfran y Pablo, quien con su grata compañía han hecho mucho más llevadera la parte final de la Tesis.

Gracias a todos.

A mi familia

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ABSTRACT ..... **V**
LISTA DE FIGURAS ..... **VII**
LISTA DE TABLAS ..... **XIII**
ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL ..... **XV**
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS **3**
1.1. Erosión y protección de la costa: Una visión global. 3
1.2. Necesidad de las regeneraciones de playa a nivel mundial. 4
1.3. Hipótesis planteadas. 6
1.4. Objetivos de la Tesis. 8
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE **13**
2.1. Antecedentes. 13
2.2. Estudios realizados sobre la porosidad de arenas litorales. 14
2.3. Densidad y porosidad de sedimentos no consolidados. 15
2.3.1. Densidad real y aparente 17
2.3.2. Porosidad 17
2.4. Técnicas y análisis de sedimentos. 18
2.4.1. Tipos de análisis 18
2.4.2. Análisis granulométrico y parámetros estadísticos 19
2.4.3. Morfología de los granos de arena 19
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO **25**
3.1. Localización. 25
3.2. Principales sistemas de playa y tipos de arena. 30
3.3. Estudios realizados en playas de la provincia de Cádiz. 33
3.3.1. Clasificación de las playas estudiadas 34
3.3.2. Tipos de arena y composición mineralógica 34
3.4. Clima atmosférico y marítimo de la provincia de Cádiz. 35
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA APLICADA ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE UNA REGENERACIÓN DE PLAYA **39**
4.1. Metodos de regeneraciones de playa 39
4.2. Metodología de la toma de datos de campo 42
4.2.1. Justificación de la elección de playas 42

4.2.2. Parámetros a estudiar 43
4.2.3. Planificación de campañas 44
4.3. Caracterización granulométrica del sedimento. 47
4.3.1. Metodología de muestreo 48
4.3.2. Metodología de análisis en laboratorio 48
4.3.3. Clasificación de sedimento por tamaño 49
4.3.3.1. Clasificaciones y unidades de medida. 50
4.3.3.2. Tamaño medio de grano (D_{50}). 51
4.3.3.3. Desviación típica (sorting) 52
4.3.3.4. Simetría (skewness). 53
4.3.3.5. Apuntamiento (kurtosis). 53
4.4. Determinación de la densidad y porosidad de la arena de playa. 54
4.4.1. Métodos volumétricos y de pesada 55
4.4.1.1. Cores de PVC 56
4.4.1.2. Probetas. 59
4.4.1.3. Testigos de acero inoxidable. 63
4.4.1.4. Picnómetro de Helio. 65
4.4.2. Métodos nucleares 68
4.4.3. Otros métodos 72
4.5. Determinación de la compactación máxima del sedimento: Ensayo Proctor modificado 74
4.6. Calibración y determinación de la metodología 76
4.6.1. Calibración del densímetro nuclear 76
4.6.2. Estudios de precisión 76
4.6.2.1. Heterogeneidad del terreno 77
4.6.2.2. Repetitividad del aparato. 82
4.6.2.3. Tiempo de medición. 82
4.6.2.4. Efecto de la marea. 82
4.7. Cálculo teórico de la porosidad de la arena. 83
4.7.1. Porosidad de la arena con un mismo tamaño de grano 83
4.7.2. Porosidad de la arena con diferentes tamaños de grano 84
4.8. Cálculo teórico de la porosidad a partir de densidades medias. 84
4.9. Cálculo real de la porosidad a partir de la densidad medida in situ. 85
4.10. Cálculo de diferencias absolutas y relativas. 87

4.11. Recopilación de datos meteorológicos y marítimos. 87
CAPÍTULO 5. RESULTADOS. 91
5.1. Resultados granulométricos. 91
5.2. Análisis y comparación de los resultados de porosidad obtenidos con distintas metodologías. 95
5.2.1. Ensayos realizados con los cores de PVC. 95
5.2.2. Ensayos realizados con las probetas 96
5.2.3. Ensayos realizados con los testigos de acero. 109
5.2.4. Ensayos realizados con el picnómetro de Helio 111
5.2.5. Ensayos realizados con el densímetro nuclear 113
5.2.6. Comparación de resultados y análisis de los errores cometidos 114
5.2.7. Elección de la mejor técnica disponible 116
5.3. Resultados de los ensayos Proctor modificado. 117
5.4. Análisis de la precisión del densímetro. 118
5.4.1. Variabilidad debida a la heterogeneidad del terreno 118
5.4.2. Variabilidad debida a la repetitividad del aparato 120
5.4.3. Variabilidad debida al tiempo de medición. 121
5.4.4. Variabilidad debida al efecto de la carrera de marea. 122
5.5. Análisis de datos meteorológicos y marítimos. 123
5.6. Variabilidad espacio-temporal de la densidad y porosidad de la arena. 125
5.6.1. Playa Victoria. 126
5.6.2. Playa Camposoto 131
5.6.3. Playa Ballena. 135
5.6.4. Playa Fontanilla. 138
5.6.5. Playa Atunara 141
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 149
6.1. Análisis granulométricos 149
6.2. Análisis de la densidad y porosidad de la arena 150
6.3. Variabilidad de la porosidad en la playa Victoria. 151
6.4. Variabilidad de la porosidad en la playa Camposoto 151
6.5. Variabilidad de la porosidad en la playa Ballena. 152
6.6. Variabilidad de la porosidad en la playa Fontanilla 153
6.7. Variabilidad de la porosidad en la playa Atunara. 153

CAPÍTULO 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 157

7.1. Resumen de la metodología utilizada 157

7.2. Ventajas e inconvenientes de cada método 158

7.3. Comparación de resultados entre los distintos métodos. 159

7.4. Resumen de resultados. 160

7.5. Publicaciones derivadas. 162

7.6. Conclusiones. 164

7.7. Nuevas líneas de investigación. 166

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 169

ANEXOS 187

ANEXO I. RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS. 189

ANEXO II. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL DENSÍMETRO NUCLEAR Y ENSAYO PROCTOR MODIFICADO. 197

ANEXO III. DATOS DEL CLIMA MARÍTIMO Y ATMOSFÉRICO 207

ANEXO IV. PUBLICACIONES DERIVADAS 221

ABSTRACT

Coastal erosion is a natural phenomenon that is a growing problem. Over the last few decades, there has been a gradual change from hard to soft coastal defence techniques. In this sense, periodic artificial nourishment is widely regarded as an acceptable method of beach and dune protection and restoration. According to Dean (2003), after beach nourishment activities are performed, sand volumetric evolution, particularly the proportion of sand volume that remains within the region where the sand was placed, is of interest. This region can be described by features such as the pore size, density, porosity, permeability and water content. The bulk density is an indicator of soil compaction, which is related to its porosity and permeability. Beach nourishment features are based on several clues: native and borrow sand quality, dredging and dumping areas, method of transport, operating budget, sand volume needed and coastal groundwater dynamics. An important consideration in sediment motion is the relative volume occupied by sediment within a sediment bed. This is quantified using porosity or grain concentration. A standard assumption in coastal engineering is that the porosity of natural beach sand (non-cohesive) is 40%. However, is this assumption correct for all beach sand? The purpose is to demonstrate that much of the volume loss after beach nourishment procedure can be due to porosity decrease. Our primary hypothesis is that any type of beach nourishment activity results in a significant increase in sand porosity, largely due to the massive and disorganised dumping of a mixture of sediment and water (in this case 20 and 80%, respectively) on the backshore and foreshore by a trailing suction hopper dredge. The porosity subsequently decreases until it reaches its native value because of waves and tides cause spatial re-accommodation of the grains.

This research proposes an accurate and simplified method to assess changes in sand porosity after beach nourishment by means of in-situ density surveys through a nuclear densimeter. This novel application has been applied to different beaches in the southwest of Spain according to the tidal range, grain size and beach morphology in several terms.

Complete monitoring of the density, humidity, grain size analysis and modified Proctor compaction test was performed at all beaches over the very short, short, medium and long term (hours, days, months and years respectively). The goal of the monitoring was to study the effect of different phenomena on the internal beach sand porosity.

General results show that sand porosities range from 25.6% to 43.4% after beach nourishment works, with maximum relative and cumulative differences in the order of

±40% over several terms. This research can be considered a support tool in coastal engineering to find shifting sand volumes as a result of sand porosity variability after beach nourishment and later marine influence.

Keywords: Porosity; beach sand; bulk density; beach nourishment; grain size analysis; beach monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Croquis de la disposición desordenada de los granos tras el vertido (A); tras el drenaje del agua intersticial (B) y tras la influencia de las mareas y el oleaje. 7

Fig. 2.1. Esquema de la clasificación del sedimento y de las diferentes formas de grano en función de su esfericidad, angularidad y redondez (Fuente: Powers, 1953).....21

Fig. 3.1. Localización geográfica del litoral de la provincia de Cádiz y playas estudiadas.(Fuente: Adaptado de la web del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo, Junta de Andalucía, 2013). 26

Fig. 3.2. Vista aérea de la playa de La Ballena, T.M. Rota. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 26

Fig. 3.3. Vista aérea de la playa de Valdelagrana, T.M. Puerto Sta. María. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)......27

Fig. 3.4. Vista aérea de la playa del Río San Pedro, T.M. Puerto Real. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)......27

Fig. 3.5. Vista aérea de la playa Victoria (apoyada en paseo marítimo), T.M. Cádiz. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 28

Fig. 3.6. Vista aérea de la playa de Camposoto (con presencia de cordón dunar), T.M. San Fernando. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 28

Fig. 3.7. Vista aérea de la playa de La Fontanilla (con el puerto pesquero-deportivo al fondo), T.M. Conil de la Frontera. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 29

Fig. 3.8. Vista aérea de la playa de El Palmar, T.M. Vejer de la Frontera. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)......29

Fig. 3.9. Vista aérea de la playa de La Atunara (con el puerto deportivo en primer plano y Gibraltar al fondo), T.M. La Línea de la Concepción. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)......30

Fig. 3.10. Esquema del escalonamiento del litoral de Cádiz producido por series de fallas transversales. Fuente (Gutiérrez-Más, 1991). 32

Fig. 4.1. Vista del frente de la cantera "El Palmar" (T.M. Arcos de la Frontera) y maquinaria......40

Fig. 4.2. Vista de la draga "Adricristuy" dragando en el interior de la dársena del puerto deportivo de La Atunara. 40

Fig. 4.3. Vista del vertido de arena en la playa Atunara (izd.) e impulsión desde la draga (der.)......41

Fig. 4.4. Esquema del perfil transversal de playa y localización de la zona de muestreo: A (playa emergida), M (intermareal) y B (próximo a la bajamar). 46
Fig. 4.5. Tamizadora electromagnética y columna de tamices utilizados.....49
Fig. 4.6. Ejemplo de la plantilla utilizada para el tratamiento de los datos obtenidos tras el análisis granulométrico. 52
Fig. 4.7. Caracterización de la distribución del sedimento en función de los parámetros sorting, skewness y kurtosis. (Fuente: Adaptada de USACE, 2002). 54
Fig. 4.8. Imagen del estrato arenoso y utensilios de trabajo para el método de cores de PVC.....58
Fig. 4.9. Vista de detalle del estrato de arena superficial.....59
Fig. 4.10. Material utilizado en el método de las probetas. 60
Fig. 4.11. Penetración manual de la probeta en la arena de playa.....60
Fig. 4.12. Vista de la agitación de la mezcla de arena y agua en la tamizadora.....62
Fig. 4.13. Vista de la introducción horizontal de los testigos a 0,2 m de profundidad.....64
Fig. 4.14. Vista de la extracción, enrasado, tapado y envasado en bolsas herméticas de los testigos llenos de arena. 64
Fig. 4.15. Detalle del anverso y reverso de la cubeta utilizada en el picnómetro de Helio.....67
Fig. 4.16. Picnómetro de Helio. 67
Fig. 4.17. Croquis de un densímetro nuclear en el modo de transmisión directa. (Fuente: www.troxlerlabs.com). 70
Fig. 4.18. Croquis de un densímetro nuclear en el modo de retrotransmisión. (Fuente: www.troxlerlabs.com). 70
Fig. 4.19. Especificaciones técnicas del densímetro nuclear utilizado. (Fuente: www.troxlerlabs.com).....72
Fig. 4.20. Detalle del infiltrómetro de doble anillo o anillos de Munz. 74
Fig. 4.21. Ejemplo gráfico de la curva descrita en el ensayo Proctor modificado para la determinación de la densidad máxima para una humedad óptima. 75
Fig. 4.22. Esquema en planta de la distribución de medidas con el densímetro nuclear en un cuadrado de 1 m^2 para la estimación de la variabilidad espacial en función de la heterogeneidad del terreno....77
Fig. 4.23. Medidas realizadas con el densímetro en la parcela de 1 m^2 en la zona de playa emergida (izd.) y en la zona media del intermareal (der.). 78
Fig. 4.24. Vista del corte vertical en el estrato, superior a los 0,6 m.....79
Fig. 4.25. Croquis en perfil de la distribución de medidas en vertical y horizontal en el estrato.....79
Fig. 4.26. Vista de la medida realizada a 0,3 m de la cornisa del estrato (arriba) y de las medidas realizadas a 0,25 m (abajo izd.) y a 0,50 m (abajo der.) de profundidad.....80
Fig. 4.27. Vista de la base del densímetro.....81
Fig. 4.28. Vista de las medidas realizadas en el mismo punto, variando la posición de la base del densímetro. 81
Fig. 4.29. Vista de la toma de 5 medidas en el mismo punto de la playa emergida (izd) y del intermareal (der).....82
Fig. 4.30. Croquis de un volumen de arena (l^3) con un tamaño de grano homogéneo (d).....83
Fig. 4.31. Situación de la boya costera 1320 de Cádiz (izd.) y el punto WANA 2006009 situado al este de Gibraltar (der.). (Fuente: Web de Puertos del Estado, 2013). 88

Fig. 5.1. Evolución del tamaño medio de grano de arena de las playas estudiadas a lo largo del tiempo. 93

Fig. 5.2. Vista del tubo de PVC insertado horizontalmente (izd) y enrasado tras su extracción (der). 95
Fig. 5.3. Vista del corte vertical dado en el estrato de arena en la playa de La Fontanilla. Potencia: 50 cm. 97
Fig. 5.4. Imagen de las diferentes profundidades (0,1 y 0,4 m) de cata donde se puede observar la probeta introducida en su totalidad. 98
Fig. 5.5. Vista de las probetas introducidas verticalmente en el sedimento con golpeteos (izd. Probeta B) y sin golpeteos (der. Probeta A) 99
*Fig. 5.6. Vista de las catas obtenidas verticalmente con golpeteos (izd. Probeta B) y sin golpeteos (der. Probeta A)*99
Fig. 5.7. Muestra analizada en laboratorio antes (izd.) y después a la adición de agua y agitación (der.). Nótese el cambio de volumen de arena y las dos fases agua-arena (der) 100
Fig. 5.8. Probeta B en laboratorio tras colmatar el sedimento de agua 102
Fig. 5.9. Detalle de la lectura de arena obtenida y extracción al vacío de la cata 104
Fig. 5.10. Vista del sedimento introducido en la probeta y detalle de lectura en la playa de El Palmar. 105
Fig. 5.11. Vista del secado (izd.) y pesado (der.) de los testigos de acero llenos de arena. 110
Fig. 5.12. Determinación del tiempo de secado de muestras según normas UNE 103-300 (1993) y ASTM D2216 (2010). 110
Fig. 5.13. Vista de la cata de arena de playa con las cubetas del picnómetro. 112
Fig. 5.14. Vista de la introducción de la cubeta llena de arena dentro del picnómetro. 112
Fig. 5.15. Variación horaria de la porosidad con la vaciante de marea en las estaciones Mberm, M y B del perfil 2 de la playa Victoria. 123
Fig. 5.16. Series diarias de altura de oleaje en la boya 1320 costera de Cádiz para los años 2010 (izd.) y 2011 (der.). (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 124
Fig. 5.17. Series diarias de altura de oleaje en la boya 1320 costera de Cádiz para los años 2012 (izd.) y 2013 (der.). (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 124
Fig. 5.18. Altura significante de oleaje registrada en el punto WANA2006009, situado en la parte mediterránea para todo el año 2011. 125
Fig. 5.19. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los 2 perfiles de la playa Victoria a corto, medio y largo plazo (D_{50}=0,24 mm; carrera marea=3,6 m). Notaciones: 0) Estado nativo; 1) Perfil 1 (P1) regenerado y efecto de la lluvia; 2) Perfil 2 (P2) regenerado; 3) paso de mareas vivas equinocciales (Coeficiente marea=1,12); 4) un mes tras las mareas vivas; 5) paso de temporales (Hs=4 m). 127
Fig. 5.20. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 2 perfiles de la playa Victoria (D50 = 0,24 mm; carrera de marea = 3,6 m). a): Variabilidad de la porosidad en P1; b) Porosidad relativa acumulada en P1; c) Variabilidad de la porosidad en P2; d) Porosidad relativa acumulada en P2. Notaciones: I) Porosidad de la arena nativa; II) inmediatamente después de la regeneración del perfil; III) tras 12h; IV) tras el efecto de las mareas equinocciales; V) tras un temporal con Hs = 5 m; VI) tras un temporal con Hs = 4 m; VII) tras un temporal con Hs = 4 m; VIII) tras un temporal con Hs = 5 m. 130

Fig. 5.21. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los 2 perfiles de la playa de Camposoto a corto (horas), medio (días-meses) y largo plazo (años). Notaciones: 1: P2 regenerado; 2: P1 regenerado; 3: paso mareas vivas; 4, 5 y 6: paso de temporales (Hs=4 m). 132

Fig. 5.22. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 2 perfiles de la playa de Camposoto (D_{50} = 0,27 mm; carrera de marea = 3,6 m; con cordón dunar). a: Variabilidad de la porosidad en P1; b) Porosidad relativa acumulada en P1; c) Variabilidad de la porosidad en P2; d) Porosidad relativa acumulada en P2. Notaciones: I) Porosidad de la arena nativa; II) inmediatamente después de la regeneración del perfil; III) tras 24h; IV) tras el efecto de las mareas equinocciales; V) tras un temporal con Hs = 5 m; VI) tras un temporal con Hs = 4 m; VII) tras un temporal con Hs = 4 m. 134

Fig. 5.23. Medidas de densidad de la arena de préstamo, en la cantera "El Palmar" (T.M. Arcos de la Frontera). 135

Fig. 5.24. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los perfiles 1, 2 y 3 de la playa de La Ballena a medio plazo (meses). Notaciones: 1: Densidad arena nativa playa; 2: Perfiles regenerados y paso de temporal (Hs=4 m); 3: Un mes tras las obras. 136

Fig. 5.25. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 3 perfiles de la playa de La Ballena (D_{50} = 0,34 mm; carrera de marea = 3,8 m; con acantilado en retroceso. a): Variabilidad de la porosidad en P1; b) Variabilidad de la porosidad en P2; c) Variabilidad de la porosidad en P3. Notaciones: I) Porosidad de la arena de playa nativa; II) inmediatamente después de la regeneración; III) Porosidad 41 días después de las obras. 137

Fig. 5.26. Vista de las medidas tomadas en el interior del recinto, junto a la tubería de descarga (izd.) y en la zona de escorrentía (der.). 139

Fig. 5.27. Variabilidad de la densidad in situ registrada en el perfil de la playa de La Fontanilla a corto, medio y largo plazo. Notaciones: 1: Densidad arena nativa original; 2: Justo tras la regeneración; 3: Paso oleaje de verano (Hs<1 m); 4: Paso temporal (Hs=5 m); 5 y 6: Paso temporales (Hs=4 m). 140

Fig. 5.28. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada en el perfil de la playa de La Fontanilla a corto, medio y largo plazo. Notaciones: a) Densidad arena nativa original; b) Justo tras la regeneración; c): Paso del oleaje de verano (Hs<1 m); d) Densidad tras pasos de temporales (Hs=4-5 m). 141

Fig. 5.29. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los perfiles de la playa Atunara a corto (días), medio (3 meses) y largo plazo (10 meses). Notaciones: 1: Densidad original; 2: Perfiles regenerados; 3: tras paso temporal (Hs=4 m); 4: tras paso de temporal (Hs<3 m). 143

Fig. 5.30. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 2 perfiles de la playa Atunara (D50 = 0,59 mm; carrera de marea = 1,5 m; con puerto adosado y diques transversales). a): Variabilidad de la porosidad en P1; b) Porosidad relativa acumulada en P1; c) Variabilidad de la porosidad en P2; d) Porosidad relativa acumulada en P2. Notaciones: I) Porosidad de la arena nativa; II) inmediatamente después de la regeneración del perfil; III) tras un temporal con Hs=4 m; IV) tras un temporal con Hs<3 m. 145

Fig. A-III.1. Datos mareales horarios registrados durante todo el año 2012 en la estación de Bonanza (T.M. Sanlúcar de Barrameda, Cádiz). (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 210

Fig. A-III.2. Datos mareales horarios registrados durante todo el año 2012 en la estación de la Bahía de Algeciras (Cádiz). (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 211

Fig. A-III.3. Histogramas de las frecuencias horarias del nivel medio del mar en la estación atlántica de Bonanza (izd.) y en la estación mediterránea de la Bahía de Algeciras (der.) durante el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 212

Fig. A-III.4. Rosa de oleaje calculada con datos de la Boya de Cádiz para el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 213

Fig. A-III.5. Rosa de oleaje calculada con datos del punto WANA 2006009 situado junto a Gibraltar para el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 214

Fig. A-III.6. Rosa de corrientes medias registradas en la Boya del Golfo de Cádiz para el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 215

Fig. A-III.7. Rosa de corrientes medias registradas en la Boya del Golfo de Cádiz para el año disponible 2006. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 216

Fig. A-III.8. Serie de temperaturas medias sobre España, periodo 1961-2012 (Fuente: AEMET, 2013). 217

Fig. A-III.9. Velocidad media del viento (m/s) y frecuencia de ocurrencia durante el periodo de estudio 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 220

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Cronograma de trabajo. 47
Tabla 4.2. Diferentes clasificaciones del tamaño de grano. (Fuente: Wentworth, 1922). 50

Tabla 5.1. Principales parámetros obtenidos tras el análisis granulométrico de las muestras maestras de arena nativa de las playas estudiadas y zonas de préstamo. 92
Tabla 5.2. Principales parámetros obtenidos tras el análisis granulométrico de las muestras maestras correspondientes a la arena de la última campaña. 92
Tabla 5.3. Clasificación de las muestras maestras correspondientes a las zonas de préstamo utilizadas y a las arenas de las playas en su estado final. 94
Tabla 5.4. Resumen de resultados del índice de granos y poros tras la penetración de las probetas con (probeta B) y sin golpeteos (probeta A) en la arena de la playa La Fontanillla. 103
Tabla 5.5. Resultados obtenidos con las probetas en la playa de Valdelagrana. 107
Tabla 5.6. Resumen de resultado del índice de granos y porosidad obtenido mediante el método de las probetas.... 108
Tabla 5.7. Variación del volumen de arena medido en el laboratorio mediante el método de las probetas. 109
Tabla 5.8. Resultados volumétricos y de pesada obtenidos con los testigos cilíndricos de acero inoxidable. 111
Tabla 5.9. Resultados de la densidad real media obtenida con el método del picnómetro de Helio. 112
Tabla 5.10. Resultados de los registros de densidad obtenidos con el densímetro nuclear. 114
Tabla 5.11. Comparación de los resultados del índice de poros obtenidos con el método de las probetas frente al método del densímetro nuclear en la playa de Valdelagrana 115
Tabla 5.12. Comparación de los resultados del índice de poros obtenidos con el método de los testigos de acero frente al método del densímetro nuclear en el perfil 2 de la playa Victoria 116
Tabla 5.13. Densidad máxima y humedad óptima tras ensayo Proctor modificado en las arenas nativas de las playas Victoria, Camposoto, Atunara, Ballena y Fontanilla, y en las arenas de préstamo utilizadas. 118
Tabla 5.14. Ensayos de la variabilidad de la densidad, humedad y porosidad debido a la heterogeneidad del terreno en 1 m² en la zona seca (P2A) y en la zona intermareal (P2M) de la playa Victoria. 119
Tabla 5.15. Datos de densidad, humedad y porosidad obtenidos en un estrato vertical a 0,25 y 0,5 m de profundidad en dos posiciones. y a una distancia horizontal de 0,3 m. 119
Tabla 5.16. Ensayos de la repetitividad del densímetro nuclear midiendo el mismo punto consecutivamente en la zona emergida (P2A) y en la zona intermareal (P2M) de la playa Victoria. 120
Tabla 5.17. Ensayos de la repetitividad del densímetro nuclear midiendo el mismo punto consecutivamente en la zona seca (P2A) y en la zona intermareal (P2M) de la playa Victoria. 121
Tabla 5.18. Resultados de la densidad, humedad y porosidad de la arena del perfil 2 de la playa Victoria durante una bajamar. 122
Tabla 5.19. Resultados de densidad, humedad y porosidad tras el vertido de arena de préstamo dentro del recinto habilitado en la playa La Fontanilla (bajo la zona de descarga y en la zona de escorrentía). 139
Tabla 5.20. Datos históricos de porosidad publicados. Adaptado de Curry et al. (2004) y actualizado. 146

Tabla 5.21. Diferencias relativas máximas de la variabilidad de la porosidad en diferentes plazos en las playas Victoria, Camposoto, Ballena, Fontanilla y Atunara. 162

Tabla A-III.1. Temperaturas medias mensuales registradas en la estación meteorológica de San Fernando, Cádiz. (Fuente: INE, 2013). 218

Tabla A-III.2. Precipitaciones total mensuales (mm) registradas en la estación meteorológica de San Fernando, Cádiz. (Fuente: INE, 2013). 218

Tabla A-III.3. Datos mensuales de la Velocidad media del viento (m/s) registrada en el Punto WANA 1054046 para los años 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013). 219

ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

En la presente sección se describe el contenido de cada uno de los capítulos recogidos en esta tesis, con el propósito de dar una visión general a este trabajo.

En el **Capítulo 1** se presentan tanto la introducción a la temática general de esta Tesis Doctoral como los principales argumentos para la ejecución y desarrollo de esta investigación. Asimismo, se expone una breve visión global de los problemas que genera la erosión costera y el papel que ejercen las regeneraciones de playa como herramienta de protección de la costa, exponiendo finalmente las principales hipótesis planteadas, así como los objetivos a cumplir en esta Tesis Doctoral.

En el **Capítulo 2** se describen los antecedentes y el estado del arte de la temática principal de la Tesis, ofreciendo una recopilación general de los estudios realizados hasta la fecha sobre la densidad y porosidad de arenas de sistemas litorales y su variación, así como los diferentes parámetros físicos que puedan afectar directa o indirectamente a la densidad y/o porosidad del sedimento. Asimismo se repasan ciertos conceptos básicos necesarios para el buen entendimiento de esta Memoria, como la densidad real y aparente de un suelo y la porosidad del mismo, así como algunas de las técnicas de análisis de sedimentos.

En el **Capítulo 3** se detalla la zona de estudio, definiendo brevemente los principales sistemas de playa estudiadas y tipos de arena que existen comúnmente en las costas gaditanas. También, se recopilan algunos estudios que hayan sido realizados en el entorno y que estén relacionados con la temática de esta Tesis. Por último se define el clima atmosférico y marítimo predominante en el medio.

En el **Capítulo 4** se exponen los métodos y técnicas empleados para el desarrollo de esta Tesis, describiendo brevemente la metodología empleada por las administraciones públicas en las regeneraciones de las playas estudiadas. Asimismo se detalla la metodología empleada para el análisis granulométrico de arenas litorales, así como la calibración y determinación de la densidad, humedad y compactación máxima de la arena. También se desarrolla la formulación para el cálculo teórico de la porosidad de la arena y los cálculos de las diferencias absolutas y relativas entre las diferentes medidas. Por último, se describe la recopilación de datos meteorológicos y marítimos de la zona de estudio.

En el **Capítulo 5**, se muestran todos los resultados obtenidos tras la aplicación de las diferentes tecnologías descritas en el Capítulo 4. Debido a la gran importancia de conocer la gradación de la arena de las playas a estudiar, se han realizado completos

estudios granulométricos de todas las muestras recogidas en cada campaña, además de desarrollar y publicar mejoras en la eficiencia de los análisis. Asimismo, se han analizado los resultados de porosidad obtenidos con cada uno de los métodos (adjuntando diversos estudios de precisión) con el fin de poder discernir la mejor técnica disponible en cuanto a eficiencia, manejabilidad y fiabilidad de la medida. Todo ello para analizar la variabilidad espacio-temporal de la densidad y porosidad de la arena tras la regeneración de las playas. Paralelamente, se han recopilado datos meteorológicos y marítimos durante todo el periodo de estudio.

En el **Capítulo 6**, se ha desarrollado de forma generalizada la discusión de las metodologías empleadas, los resultados obtenidos tras los ensayos de precisión y del Proctor modificado, así como los resultados granulométricos y de porosidad obtenidos particularmente en cada una de las playas estudiadas.

El propósito del **Capítulo 7** es presentar un resumen de los aspectos más significativos de los resultados obtenidos y publicaciones derivadas de esta memoria. También se han descrito las conclusiones y las posibles futuras líneas de investigación derivadas de la elaboración de esta Tesis Doctoral.

Asimismo, en un apartado diferenciado se listan todas las **referencias bibliográficas** utilizadas. Debido a la elevada densidad de los contenidos tratados en los capítulos, se ha estimado conveniente mostrar todos los resultados y documentación pertinente en **4 Anexos** a la presente Memoria.

CAPÍTULO PRIMERO

Regeneración de la playa de Regla (T.M. Chipiona, Cádiz), 1992

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Erosión y protección de la costa: Una visión global.

A lo largo de las últimas décadas, las zonas costeras han sido ampliamente demandadas como zona de construcción de núcleos urbanos e industriales. El elevado interés humano en esta área ha ido creciendo considerablemente en todas los países del mundo con franja litoral, especialmente en Europa. Según un estudio realizado por la Comisión de la Unión Europea (UE), 70 de los 455 millones de ciudadanos de la UE, es decir un 16% de la población, vive en municipios costeros, y hoy en día continúa aumentando (Eurosion, 2004). Además, según la Oficina de Estadística de la UE, casi la mitad de la población de países de la UE con borde litoral, está localizada en zonas costeras (Eurostat, 2009). Este gran incremento de población ha provocado históricamente una gran demanda de zonas urbanizables para viviendas habituales y de segundas residencias, así como zonas industriales muy relacionadas con la cultura y el transporte marítimo. Normalmente, las actividades económicas imponen una presión sobre las áreas naturales, pero en el caso de las zonas costeras se añaden otros aspectos ambientales más específicos. Estos incluyen la proliferación de obras costeras, la utilización intensiva de las orillas naturales para el uso recreativo y el turismo (Barragán, 2003), así como la extracción de gravas y arenas destinadas a la construcción. Las actividades económicas también pueden contribuir a acelerar la erosión de las costas europeas, una de las más visibles de estas consecuencias es la inexorable y silenciosa destrucción del ambiente costero.

Por lo general, la erosión costera se manifiesta cuando el mar gana terreno a causa del viento, del oleaje y de las mareas en un contexto de déficit sedimentario. Esta erosión resulta de la combinación de varios factores, tanto de origen natural como humano, que operan a diferente escala. En el primer caso, los cambios naturales de playa generalmente conllevan procesos erosivos y sedimentarios, los cuales se dan como respuesta a cambios en el régimen de ola incidente y en el rango de marea (Anfuso et al., 2000). En el segundo caso, las infraestructuras humanas se han ido construyendo excesivamente cerca de la línea de costa, viéndose posteriormente afectadas por la erosión (Román-Sierra et al., 2004).

La erosión es un proceso natural que siempre ha existido y que ha dado forma a las costas a lo lago de la historia, pero ahora está claro que su dimensión está lejos de ser la

natural. Todos los países costeros de la UE están afectados por la erosión costera. En el 2004, aproximadamente 20.000 kilómetros de costa de la Unión, un 20% del conjunto, se han visto afectados por serios impactos (Eurosion, 2004). En la mayor parte de dichas zonas existe un retroceso efectivo de la línea de costa (15.100 km), a veces a pesar incluso de las obras de defensa (2.900 km). Además, existen otros 4.700 km de costa que han sido estabilizados artificialmente. En muchos lugares las tentativas para remediar esta situación, por ejemplo mediante la construcción de espigones, pueden empeorar la situación provocando una erosión más intensa en las zonas adyacentes. Por otro lado, si no se actúa, la erosión antrópica comprometerá a largo plazo la capacidad de las zonas costeras para adaptarse a los efectos del cambio climático, particularmente a la subida del nivel del mar y al crecimiento de la magnitud y frecuencia de los temporales (VVAA, 2007). Diversos estudios de investigación desarrollados en España han indicado que sin regeneraciones de playas y con una subida media del nivel del mar de 0,5 m (en un escenario razonable para España en el año 2100), podría resultar en la desaparición del 40% de las playas en el Este de Cantabria o el 50% del Delta del Ebro en Cataluña (Sánchez-Arcilla et al., 2008). Asimismo, de forma general, la costa española mediterránea está especialmente en riesgo: El total de línea de costa sujeta a la erosión en 2001 fue de 757 Km, es decir un 11,5% del total. En este sentido, las comunidades mediterráneas que presentan una línea de costa más afectada por la erosión serían Andalucía (41%), Cataluña (33%) y Valencia (26%), a pesar de que estas regiones cuentan con estructuras de defensa y playas artificiales a lo largo del 25% de su costa (Comisión Europea, 2009). A estos datos hay que añadir la elevada presión demográfica y turística que ha sufrido la costa española en los últimos 50 años, hasta el punto de convertirse en la tercera en importancia turística mundial, tras los EE.UU. y Francia (Muñoz-Perez et al., 2000; 2001).

1.2. Necesidad de las regeneraciones de playa a nivel mundial.

A lo largo de las últimas décadas, ha existido un cambio gradual desde el uso de técnicas "duras" de ingeniería (utilizando hormigón o escollera para fijar la línea de costa y proteger los bienes e instalaciones costeras) hacia las técnicas "blandas" de ingeniería, realizadas en función de los procesos de transporte litoral, o utilizando el propio medio natural - arenales, dunas, marismas o vegetación - para impedir que la erosión llegue tierra adentro (Gómez-Pina et al., 2002). La regeneración de una playa es una técnica antrópica basada en la aportación de arenas procedentes del ámbito marino y/o terrestre, de un área

con suficiente cantidad de arena a otra a regenerar con déficit de la misma. Generalmente se aplica en zonas costeras que sufren continua regresión debido principalmente a la erosión litoral y que poseen un suficiente interés turístico para la sociedad. Este tipo de playas suele presentarse en zonas urbanizadas asociadas a algún tipo de construcción anexa como paseos marítimos, puertos, espigones, diques y otras edificaciones (Negro-Valdecantos, 2002).

Respecto a la regeneración periódica de playas con una alta tasa de erosión, está considerada como un método ambientalmente aceptable de protección y restauración de la costa, tanto para necesidades urgentes en un corto espacio de tiempo, como en términos de largo plazo (Trembanis y Pilkey, 1999; Hanson et al., 2002; Ramsey et al., 2008; Román-Sierra et al., 2011). En los casos concretos de Holanda y España, desde 1990 se han ido realizando satisfactoriamente regeneraciones sistemáticas de sistemas litorales de playas y dunas. La realimentación de arena es particularmente exitosa si: 1) es una medida de seguridad eficaz; 2) es rentable y 3) brinda oportunidades a otros posibles usos de la costa (Eurosion, 2004).

Por tanto, existe una necesidad general de regeneraciones de playas arenosas en el litoral europeo, debido a la erosión experimentada por la mayoría de las costas. Como consecuencia, se han desarrollado varios estudios sobre gestión y evaluación económica de las erosiones de playas y las regeneraciones en diversos países del mundo (James, 2000; Muñoz-Perez et al., 2001; Hamm et al., 2002; Hanson et al., 2002; Landry et al., 2003; Roberts and Wang, 2012), estimando gastos anuales sobre 100 millones de dólares en regeneraciones de playas de la costa atlántica de los Estados Unidos de América durante los años 90 (Trembanis y Pilkey, 1999). Más concretamente en el Golfo de Cádiz, durante la década de los 90 se ejecutaron un total de 38 regeneraciones de playa, estimándose un gasto medio de 3,75 millones de dólares estadounidenses por año (Muñoz-Perez et al., 2001), mientras que en la década siguiente dicho gasto medio fue de 6 millones de euros por año, (Muñoz-Pérez y Gómez-Pina, 2010; Muñoz-Pérez et al., 2013).

Estos gastos suponen un gran impacto económico para los gobiernos de los países, por lo que se han llevado a cabo numerosos estudios para tratar de optimizar el gasto público en la protección de la costa mediante regeneraciones de playa (Hamm et al., 2002 y Hanson et al., 2002), el uso de espigones de escollera o arrecifes artificiales (Muñoz-Pérez y Gutiérrez-Más, 1999 y Muñoz-Pérez, 2008) y mediante la optimización de la toma de datos y seguimientos topográficos y batimétricos (Negro-Valdecantos, 1990; Muñoz-Pérez, 1996; Anfuso et al., 2001; Muñoz-Perez, 2002; Benavente et al., 2002; Rodriguez et al., 2003;

Benavente et al., 2005; Baptista et al., 2008; Román-Sierra et al., 2008; Rodriguez et al., 2009; Montoya et al., 2010; Navarro et al., 2010; Navarro et al., 2011 y Muñoz-Pérez et al., 2012). No obstante, hasta la fecha de hoy, aún no se han realizado estudios concretos que expliquen las causas de las grandes variaciones volumétricas que ocurren en la arena inmediatamente tras la regeneración de una playa (sin episodios erosivos o acumulativos aparentes), ni posteriormente a corto, medio y largo plazo, a través del estudio de la densidad y porosidad de la estructura interna del sedimento. En este sentido y de acuerdo con Dean (2003), el estudio de la evolución del perfil transversal de una playa tras su regeneración es de gran interés, particularmente la variación del volumen de arena dentro de la región donde ésta fue vertida.

1.3. Hipótesis planteadas.

Durante una regeneración de playa, se realiza un vertido masivo de una mezcla de arena y agua, normalmente en la parte supramareal de la playa. La disposición de los granos de arena recién vertidos se presupone a priori de tipo aleatorio. Su primera disposición espacial tras el vertido, debe depender en gran medida de la morfología y densidad (composición mineralógica) de los granos de arena. En principio, éstos se conformarán de una manera más estructurada según se trate de granos compuestos mayoritariamente de silicatos en forma de cuarzo (aspecto de grano más cúbico) o de una manera más desordenada, siendo éste el caso de los bioclastos (restos de conchas de carbonato cálcico). La estructuración desorganizada del sedimento adquirida a priori conllevaría a un aumento de la porosidad y por tanto del volumen de arena aparente en la playa (disminución de la densidad aparente). De acuerdo con MMA (1998), una vez que la estructura entre en contacto repetidamente con el oleaje y la marea, los granos se dispondrían uniformemente, adaptando su morfología los unos a los otros y su volumen disminuiría ostensiblemente (Figura 1.1). De acuerdo con Jódar et al., (2000), los procesos de asentamiento y acomodación progresiva que sufre la arena vertida en la playa, se encuentran controlados por el tiempo y la acción de los agentes hidrodinámicos, los cuales producen una selección mecánica y variaciones en las propiedades del sedimento.

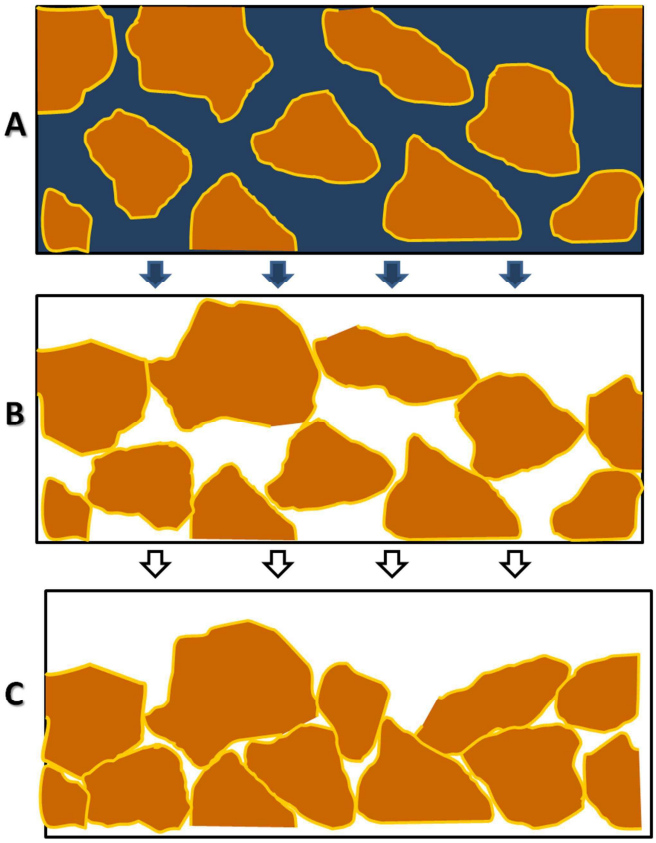


Fig. 1.1. Croquis de la disposición desordenada de los granos tras el vertido (A); tras el drenaje del agua intersticial (B) y tras la influencia de las mareas y el oleaje.

El estudio de la evolución de parámetros internos del sedimento como la densidad, la humedad, la porosidad, la compactación, la granulometría y el índice de granos y de huecos del sedimento de una playa antes, durante y después de una regeneración, constituirán la base para contrastar las siguientes hipótesis:

- ✓ A día de hoy, existe una asunción estándar en ingeniería de costas que la porosidad media de arenas naturales no cohesivas es del 40% constante para cualquier cálculo de ingeniería o de transporte de sedimentos, mientras que el contenido de granos es del 60% (United States Army Corps of Engineers (USACE), 2002).
- ✓ El sedimento vertido masivamente en una playa durante una regeneración, se dispone caóticamente a nivel granular de tal manera, que su volumen aparente en la playa es mayor que el volumen vertido. Inmediatamente después del vertido de arena, el índice de huecos o porosidad debería ser mayor al índice de huecos normalizado para todo tipo de arenas por el (USACE, 2002).

- ✓ La velocidad del drenaje del agua atrapada en la estructura de arena recién vertida variará en función de fenómenos físicos como la presión intersticial, la compactación del sedimento, la carrera de marea, la altura de ola, etc. Si dicho flujo de escape del agua intersticial es suficientemente lento (Martin, 1970 y Martin y Aral, 1971), con un nivel energético bajo, provocaría la entrada de aire en las cavidades intergranulares, lo que mantendría la estructura de apoyo inicial de los granos de arena y, durante un cierto tiempo, un volumen aparente de huecos superior al normal (Figura 1.1).

- ✓ Al igual que sucede en dicha estructura sedimentaria tras un vertido masivo de arena, tras la removilización y posterior sedimentación provocada por un temporal, se supone que los granos de arena podrían disponerse de manera similar a la Figura 1.1, alterando así su estructura y ocasionando un aumento de la porosidad.

- ✓ Tras el sometimiento del sedimento a la acción hidrodinámica de las mareas y del oleaje, los granos deberían reorganizarse uniformemente de forma natural, adaptando su morfología unos granos con otros. Este efecto de reestructuración granular debería aumentar el índice de granos y disminuir el índice de huecos del sedimento hasta niveles similares a los establecidos en USACE (2002), y con ello disminuir ostensiblemente el volumen aparente vertido. Esta hipótesis lleva a pensar que el volumen aparente medido en la playa inmediatamente después de un vertido de arena, puede estar sobreestimado respecto al que realmente permanece, pasado un lapso de tiempo tras la regeneración de la playa.

1.4. Objetivos de la Tesis.

Con el fin de poder demostrar las hipótesis planteadas anteriormente, el principal objetivo de la presente Tesis Doctoral es el **estudio de la variación de la densidad y porosidad de la arena de varias playas de la provincia de Cádiz, registrando y analizando su comportamiento antes, durante y después de su regeneración**. Las actuaciones sobre los diferentes tipos de playa que se van a estudiar van a consistir principalmente en regeneraciones ejecutadas mediante vertido directo con draga de succión

marina o con medios terrestres (maquinaria pesada y/o camiones). De manera complementaria, se cubrirán los siguientes objetivos específicos:

- Presentación de una nueva aplicación (método del densímetro nuclear) para la determinación in situ de la densidad y humedad de la arena de playa, así como la determinación de la compactación a través de ensayos Proctor modificado realizados en laboratorio.

- Desarrollo de una sencilla formulación para el cálculo de la porosidad de la arena a partir de los datos de densidad registrados in situ.

- Determinación de la efectividad de las diferentes metodologías ensayadas para el cálculo de la porosidad de la arena durante una regeneración de playa y mejora de las mismas.

- Dar explicación a las grandes variaciones volumétricas que ocurren en la arena justo tras la regeneración de una playa (sin episodios erosivos o acumulativos aparentes), estudiando el comportamiento de la porosidad.

- Puesta en valor de la utilidad de la metodología, resultados y conclusiones alcanzadas para la optimización de los actuales procesos técnicos de regeneraciones de playa, a través de un mejor entendimiento de los procesos internos que ocurren en el sedimento tras una regeneración de playa.

CAPÍTULO SEGUNDO

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes.

La realización de la presente Tesis Doctoral responde a una serie de necesidades científicas, técnicas y económicas que engloban las actuales actuaciones de regeneración de playa como la aplicación de "técnicas blandas" para tratar de paliar la erosión costera y mantener la actual línea de costa. En cuanto a las necesidades científicas, las hipótesis y objetivos aquí planteados, no habían sido aún demostrados a la comunidad científica internacional. La consecución de los objetivos, podría suponer una mejora en la eficiencia de la metodología actual de las regeneraciones de playa respecto al volumen necesario de arena. Esto se conseguiría conociendo a priori un patrón aproximado del comportamiento de la estructura interna sedimentaria tras una regeneración de playa y su posterior evolución frente a los diferentes factores hidrodinámicos (mareas y oleajes principalmente). Dicha mejora técnica supondría, sin lugar a dudas, una optimización del uso y necesidades de arenas para la regeneración de la playa, optimizando los gastos económicos del dragado, transporte, vertido y perfilado de arena (no proyectados), así como un mayor control de los impactos ambientales provocados por la propia obra.

La presente Tesis Doctoral parte del elevado interés mostrado por la administración pública competente para el mantenimiento y conservación de las playas del borde litoral gaditano (Ley de Costas, 1988): la Demarcación de Costas en Andalucía-Atlántico en Cádiz (DEMCA), perteneciente a la actual Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). Solamente en la década de los años 90, la DEMCA ejecutó un total de 38 campañas de regeneraciones en 28 playas distintas. El volumen medio de arena empleado para la regeneración de más de 400 Km de línea de costa fue de 12 millones de metros cúbicos, con un coste total de 37 millones de dólares (Muñoz-Pérez et al., 2001). Entre los años 2000 y 2011 el volumen de arena utilizado para el mantenimiento de las costas gaditanas fue sólo de 3,5 millones de metros cúbicos de arena, pero con un mayor coste anual: 6 millones de euros por año, frente a los 3,6 de la década de los noventa (Muñoz-Pérez y Gómez-Pina, 2010; Muñoz-Pérez et al., 2013). Debido a la necesidad general de regeneraciones de playas arenosas en el litoral gaditano, motivado por la erosión sufrida por la mayoría de las playas, especialmente en la

costa noroeste (Muñoz-Pérez y Enríquez, 1998), la DEMCA desarrollo una serie de estudios preliminares en colaboración con la Universidad de Cádiz (MMA, 1998 y Jódar et al., 2000) con el fin de estudiar la evolución del comportamiento mecánico y estadístico de los sedimentos tras una regeneración de playa. De este modo, esta Tesis trata de investigar detalladamente la evolución de la densidad y la porosidad de la arena tras una regeneración de playa con el fin de ampliar el conocimiento sobre su comportamiento a la vez de aportar una serie de mejoras técnicas que pueden ser aplicables tanto a nivel local como global.

2.2. Estudios realizados sobre la porosidad de arenas litorales.

La porosidad de los depósitos de arenas de playas y dunas ha sido estudiado amplia e históricamente por Fraser (1935), Tickell y Hiatt (1938), Ludwick (1956) y Pryor (1973), así como los depósitos de arena del Holoceno en islas barreras (Beard y Weyl, 1973). En un estudio clásico, Graton y Fraser (1935) mostraron que la clasificación del sedimento, la forma del grano y la compacidad son los principales responsables de las variaciones de la porosidad en arenas experimentales. En este sentido, se han realizado numerosos estudios previos para aplicaciones de ingeniería geológica y geotécnica para la medición de porosidades máximas y mínimas de diferentes distribuciones granulométricas y clasificaciones del sedimento (King, 1899; Terzaghi, 1925; Trask, 1931; Kolbuszewski, 1948; Gaither, 1953; Erchul and Nacci, 1972; Jackson, 1975; Jackson et al., 1978; Arulanandan, 1991; Curry et al., 2004; Bloom et al., 2010). Asimismo, con el objetivo de un mejor entendimiento de los procesos costeros y problemas asociados a la investigación costera, se han desarrollado interesantes estudios referentes a las propiedades físicas del sedimento (tamaño de grano, porosidad, permeabilidad, compactación, etc.) de depósitos marinos en zonas someras y profundas (Hamilton and Menard, 1956; Breslau, 1967; Faas, 1969; Hamilton and Bachman, 1982; Briggs, 1994; MMA, 1998; Jódar et al., 2000; Curry et al., 2004; Briggs et al., 2010; Reed et al., 2010; Kakinoki et al., 2011; Poizot et al., 2013; Muñoz-Perez et al., 2013).

A pesar de todos los estudios mencionados anteriormente, hasta la fecha de hoy no se han estudiado los cambios producidos en la densidad y porosidad ocurridos en la estructura interna del sedimento durante una regeneración de playa y su posterior evolución a corto, medio y largo plazo frente a la acción de diferentes agentes marinos.

Las dimensiones del sistema intersticial de las playas arenosas están definidas por la granulometría y la forma de grano, pudiendo ser descrito por características como el

tamaño de poro, la densidad, la permeabilidad y el contenido de agua (McLachlan y Turner, 1994). El análisis y resultado de la estructura interna del sedimento dependerá en gran medida de las características físicas de la arena de préstamo y nativa, así como de las características energéticas de la zona a evaluar: rango de marea y altura de oleaje. En función de la porosidad de la arena, el sedimento de la playa a estudiar tendrá diferentes efectos sobre la sobreelevación del nivel medio del mar y su drenaje e infiltración (Packwood, 1983; Kang et al., 1995 y Nielsen et al., 2001). Asimismo, la compactación del sedimento es importante para la predicción del volumen de arena y la porosidad, determinando ésta la densidad y la permeabilidad, siendo un valor vital para la modelización del comportamiento del sedimento (Chuhan et al., 2002, 2003). Según Poizot et al., (2013), la permeabilidad de un lecho arenoso puede ser correlacionada, además de con la porosidad, con el tamaño de grano y la esfericidad. En este sentido, una consideración importante en fórmulas aplicadas al transporte sedimentario (S_l) es el índice de porosidad (η):

$$S_l = \frac{I_l}{(\rho_s - \rho_w) \times g \times (1 - \eta)} \tag{1}$$

Donde ϱ_s y ϱ_w son respectivamente las densidades del sólido y del agua de mar, g es la aceleración debida a la gravedad, e I_l es el peso del material transportado longitudinalmente por segundo (Kamphuis et al. 1986).

2.3. Densidad y porosidad de sedimentos no consolidados.

El sedimento se puede definir como un material fragmentado, formado por rocas erosionadas. Las propiedades fundamentales de los granos individuales del sedimento son el tamaño y la forma del grano, la densidad del sedimento y la composición química. Según USACE (2002), la densidad puede ser definida como la masa por unidad de volumen de un material, la cual es medida en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), según el Sistema Internacional (SI) o toneladas por metro cúbico (T/m^3). La densidad real del sedimento depende de la composición mineralógica. Los minerales comúnmente encontrados en ingeniería costera incluyen sílice en forma de cuarzo, el feldespato, minerales de arcilla, y carbonatos. Una gran parte del sedimento en ambientes costeros está formado por cuarzo, debido a que es un material muy abundante en la corteza terrestre y resiste erosiones químicas y físicas. Las densidades del cuarzo (2650 kg/m^3) y del agua de mar (1025 kg/m^3) son normalmente asumidas por la mayoría de los autores para el desarrollo de fórmulas de

transporte de sedimento costero (Van Rijn, 2007). Cuando en vez de la densidad del grano abordamos la de la arena (considerando granos y huecos), la densidad varía en un rango entre 1650 y 1950 kg/m^3 (Roberts et al., 1998; Van Rijn, 2007; USACE, 2002).

Así pues, una consideración importante en transporte sedimentario es el volumen relativo ocupado por el sedimento dentro de un lecho arenoso. Esto se cuantifica usando la porosidad o la concentración del sólido. Esta concentración se puede definir como la fracción del volumen ocupado por el sedimento dentro de un lecho arenoso, mientras que la porosidad sería la cavidad porosa dentro de ese lecho. De acuerdo con Curry et al. (2004), para sedimentos arenosos (sin reparar en el tamaño de grano), rara vez la porosidad alcanza el límite de esferas bien empaquetadas (con una porosidad en torno al 26%), sino que según la disposición aleatoria de los granos en la naturaleza, diversos autores consideran la porosidad entre un 35% y un 40% (Soulsby, 1991; Van Rijn, 2007 y Reis y Gama, 2010). Estudios recientes (Tang et al., 2002; Wheatcroft, 2002; Briggs et al., 2010 y Reed et al., 2010) realizados con diferentes técnicas han establecido que la porosidad de lechos marinos, compuestos mayoritariamente por arenas medias (con un mínimo de un 98% de cuarzo), se encuentra entre un 36,6 y un 43,6%. Según USACE (2002), de forma general, la porosidad no depende del tamaño de grano, aunque es sensible a la clasificación del sedimento (sorting): arenas bien clasificadas tendrán una porosidad en torno al 45%, mientras que arenas pobremente clasificadas, tendrán bajas porosidades debido a que los granos de la fracción fina rellenaran los poros existentes entre los granos gruesos. De este modo, la clasificación del sedimento, aparece como un factor dominante en el control de la porosidad deposicional de arenas no consolidadas (Beard y Weyl, 1973; Dickinson y Ward, 1994 y Wheatcroft, 2002). Según Pryor (1973), la permeabilidad cambia con el tamaño de grano, mientras que la porosidad cambia con la clasificación (sorting). Factores como la porosidad, número medio de contactos por grano, y el porcentaje de granos con un número dado de contactos son controlados primordialmente por la clasificación y la compacidad, mientras que el porcentaje de tipos de contacto está en función del tamaño de grano (Gaither, 1953). Según Beard and Weyl (1973), los datos de porosidad de muestras de arenas bien compactadas permanecen sobre el mismo valor cuando variamos el tamaño de grano y fijamos la clasificación, pero la porosidad decrece desde una media de 42,4% (para arenas extremadamente bien clasificadas) hasta una media de 27,9% (para arenas muy pobremente clasificadas). Según USACE (2002), datos fiables de porosidad del sedimento no están normalmente disponibles a nivel científico. A día de hoy, existe una asunción estándar en ingeniería de costas de que la porosidad media de arenas naturales no cohesivas

es del 40%, mientras que el contenido de granos es del 60%, aunque los valores reales de arenas es probable que varíen muy significativamente respecto a esos valores (Galvin, 1979).

2.3.1. Densidad real y aparente

La densidad (ϱ) es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa (m) contenida en un determinado volumen (v) de una materia, expresándose en kilogramo por metro cúbico dentro del Sistema Internacional de unidades.

$$\varrho = m / v \tag{2}$$

El lecho arenoso de una playa, como todo cuerpo poroso, tiene dos densidades: La densidad real (densidad de sus partículas sólidas) y la densidad aparente (densidad media de todo el volumen del lecho arenoso). La densidad aparente contempla el contenido total de porosidad en un suelo, reflejando la compactación y facilidad de circulación de agua y aire. La densidad aparente de un material no es una propiedad intrínseca del propio material y depende de su compactación (UNE 103-302, 1994).

2.3.2. Porosidad

De forma general, se puede expresar que la porosidad de la arena o fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un volumen de sedimento (UNE 7045, 1952). La fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, está entre 0 y 1 (en tanto por uno). En edafología, la porosidad de un suelo viene expresada por el porcentaje de huecos existentes en el mismo frente al volumen total medido. A efectos prácticos, la porosidad (η) puede calcularse de forma sencilla a partir de las densidades real (ϱ_r) y aparente (ϱ_a) de la arena:

$$\eta = (\varrho_r - \varrho_a) / \varrho_r \tag{3}$$

Según el capítulo de "propiedades de los sedimentos costeros" del Coastal Engineering Manual estadounidense (USACE, 2002), la porosidad, la densidad y la permeabilidad del sedimento son propiedades muy relacionadas entre sí, puesto que surgen del hecho de que los sedimentos tienen espacios vacíos entre los granos. Asimismo, la porosidad está en función de la compactación y unión entre los diferentes granos, y por tanto, no es constante para un mismo sedimento determinado (USACE, 2002).

2.4. Técnicas y análisis de sedimentos.

En este apartado, se anuncian efímeramente algunas de las técnicas más comunes de estudios sedimentológicos, tanto en análisis físicos, como químicos y biológicos.

2.4.1. Tipos de análisis

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, 1994), editó unas Recomendaciones para la Gestión del Material Dragado (RGMD), en las que incluían una serie recomendaciones de análisis físicos, biológicos y químicos a realizar en los sedimentos dragados en los puertos españoles. Asimismo, dichas recomendaciones ofrecían una serie de valores de referencia (niveles de acción) para conocer si el material era o no apto para reutilizarlo en regeneraciones de playas, estableciendo diferentes categorías de contaminación de sedimentos en virtud de dichos niveles de acción. Las RGMD relacionan una serie de estudios necesarios para conocer adecuadamente la gestión que se le debe aplicar a ese material dragado, en función de su contaminación. Para conocer el nivel de contaminación del sedimento, es decir, los niveles de acción del material, las RGMD relaciona una serie de análisis en dos etapas consecutivas: Primera etapa para la caracterización física, y si hubiera lugar, biológica. La segunda etapa comprende la caracterización química del sedimento en cuanto a su contenido en substancias tóxicas.

En cuanto a los análisis de tipo físico, las RGMD requieren la granulometría, la concentración de sólidos y el contenido en materia orgánica o carbono orgánico total (COT). Sólo en el caso de que hubiera sospecha de contaminación microbiológica, se efectuarían en este caso los análisis biológicos.

Todos los análisis de tipo químico se realizarán sobre la fracción inferior a 63 μm, es decir, sobre la fracción de limos y arcillas. Debido a la diferente toxicidad, ubicuidad, concentración y persistencia de los contaminantes, las RGMD establecen dos grupos de parámetros: Grupo A (metales pesados y algunos Policlorobifenilos -PCB's-) y Grupo B (Arsénico, todos los PCB's, pesticidas organofosforados, compuestos orgánicos de Estaño, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's), otros metales pesados, compuestos orgánicos de Silicio, y otros compuestos orgánicos específicos).

En función de los resultados y su valoración, la gestión del material dragado podrá ser la reutilización en regeneraciones de playa, vertido directo en aguas abiertas, o su gestión y traslado a vertedero autorizado para la descontaminación del material.

2.4.2. Análisis granulométrico y parámetros estadísticos

El análisis granulométrico es una técnica de laboratorio cuya finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo (arena en este caso). Existen varias revisiones de las técnicas convencionales usadas en el análisis de tamaños de partículas geológicamente modernas (Syvitski et. al, 1991; Barbanti y Bothner, 1993; Beuselinck et. al, 1998), consistiendo principalmente en una división de la muestra de sedimento en un número definido de fracciones de tamaño, consiguiendo una distribución del tamaño de grano a partir del porcentaje del peso o volumen de cada fracción de sedimento (Blott y Pye, 2001). Las granulometrías matemáticas fueron propuestas originariamente por Matheron (1975) para caracterizar procesos de cribado en diferentes tamices, obteniendo una clasificación comprensible del material dependiendo del grano y la textura, ofreciendo así un análisis estadístico del tamaño de grano (Chen y Dougherty, 1994). Actualmente, las técnicas empleadas en la determinación del tamaño de grano incluyen la medida directa, el tamizado por vía seca y/o húmeda, la sedimentación, la medición mediante laser, rayos-X, y el Coulter counter (Blott y Pye, 2001).

Los parámetros estadísticos que describen una distribución de tamaños de grano suelen ser: el tamaño medio (D_{50}), la desviación típica (*sorting*), la simetría (*skewness*) y el apuntamiento o achatamiento (*kurtosis*). Dichos parámetros se pueden determinar a través de un análisis granulométrico mediante el método del tamizado.

2.4.3. Morfología de los granos de arena

La forma del grano es una propiedad fundamental de las partículas sedimentarias, además de ser una de las que presenta mayor dificultad para su caracterización y cuantificación (Blott y Pye, 2008). Las partículas de arena de una playa parecen bastante homogéneas; sin embargo, esto no es del todo cierto. Existe un gradiente en la medida de los granos de la arena (Fig. 2.1) distribuido desde la orilla hasta la parte más alta de la playa (Blott y Pye, 2001). Este gradiente viene determinado por una sedimentación selectiva, en función del peso de las distintas partículas que son transportadas por las corrientes inducidas por el oleaje y la carrera de marea (Nielsen et al., 2001), además del viento. Según Pryor (1973), la forma de los granos tiene el potencial de explicar la historia del transporte sedimentario, origen y ambientes deposicionales.

La disposición espacial de los granos de arena tras el vertido, y por tanto su porosidad adquirida, viene determinada por varios parámetros intrínsecos al grano de arena (Gaither, 1953) y que serán tenidos en cuenta a lo largo de la presente Tesis Doctoral:

- Tamaño de grano de arena: Debe estar comprendido entre 1/16 mm. y 2 mm. Este rango recoge todo el espectro de las arenas finas, medias y gruesas. Por debajo de este tamaño mínimo se considera limo y arcilla y por encima del máximo serían gravas, bolos y cantos rodados (Wentworth, 1922; Shepard, 1954; Tanner, 1969 y Blott y Pye, 2012).

- Composición mineralógica: Dependerá, sobre todo, del tipo de roca presente en el lugar de formación (Pettijohn et al., 1987).

- La esfericidad: Relación entre las tres dimensiones del grano (largo, ancho y alto). Será más esférica cuanto más iguales sean estas medidas. Este parámetro define cómo de bien un grano coincide con la forma de una esfera de un volumen equivalente, no resultando fácil de calcular y siendo además frecuentemente confundido con la forma y la redondez (Blott y Pye, 2008). En este sentido, Zingg (1935) ofrece un modo útil y rápido para el cálculo de la esfericidad, comparando los ejes largos, intermedios y cortos de los granos anchos. Las tasas de esos ejes pueden ser comparadas entre sí mediante el diagrama de Zingg (1935).

- La redondez: Determina el grado de erosión de sus bordes. Generalmente los granos de arena erosionados por el agua de mar tienen mayor redondez que la erosión provocada por el viento. La angulosidad y la redondez son conceptos distintos a esfericidad u oblicuidad y pretenden caracterizar la aspereza de los granos. La definición oficial compara el radio medio de los bordes vs. el radio de la esfera máxima que circunscribe (Kaufman, 2006). Esto también es difícil de calcular; para ello se realizó una rápida clasificación visual que aún se utiliza hoy en día (Powers, 1953).

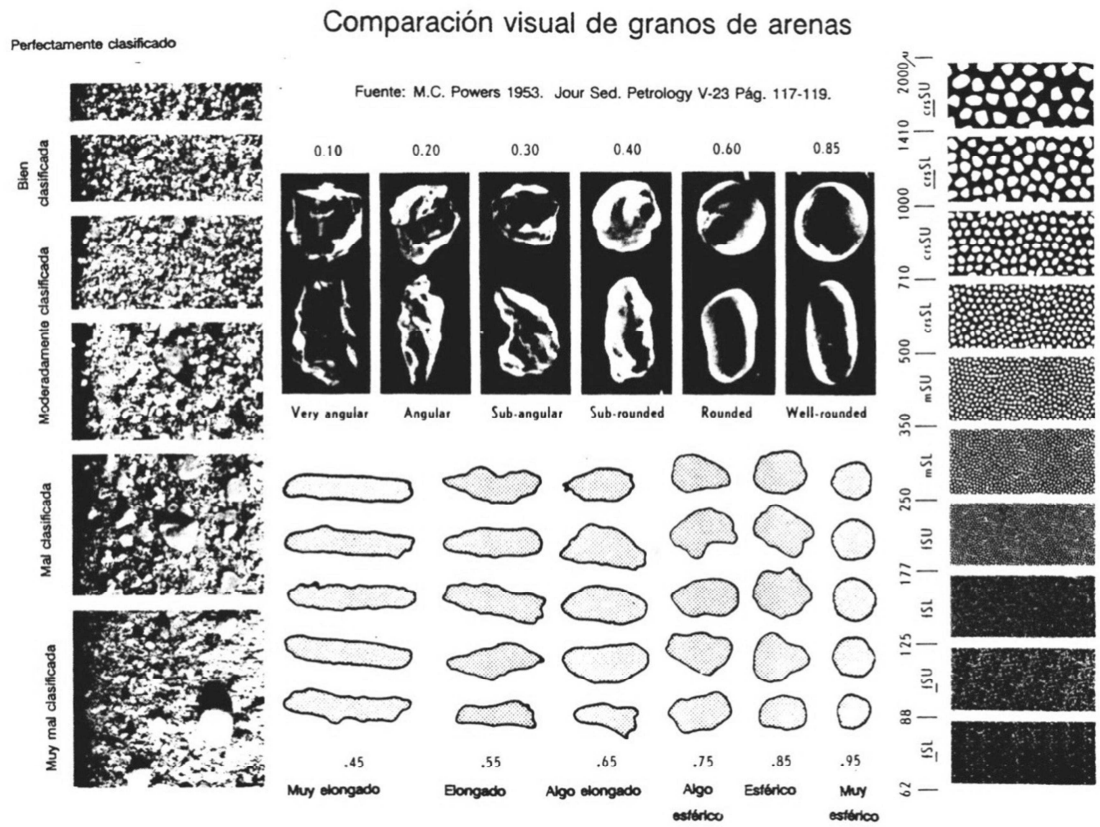
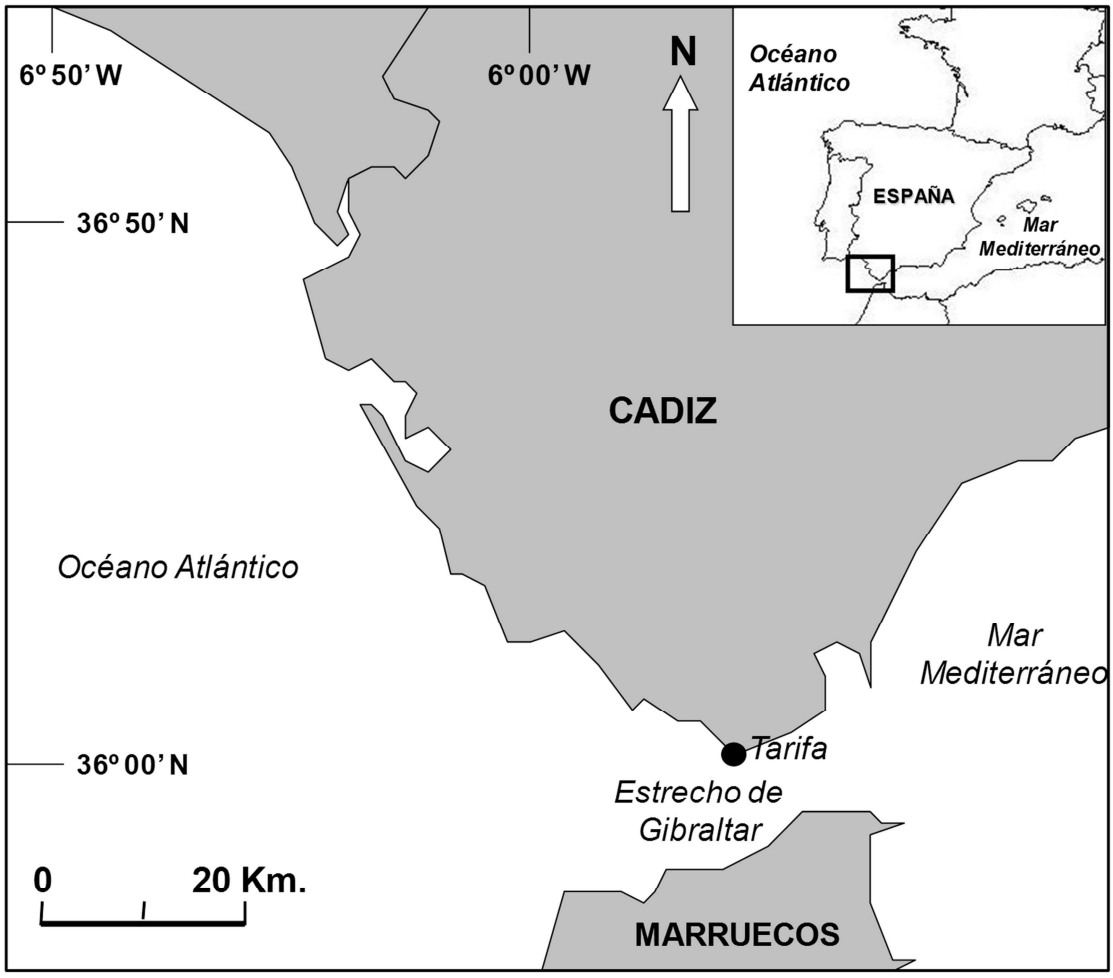


Fig. 2.1. Esquema de la clasificación del sedimento y de las diferentes formas de grano en función de su esfericidad, angularidad y redondez (Fuente: Powers, 1953)

CAPÍTULO TERCERO



DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Localización.

La línea de costa estudiada se localiza en el SO de la península ibérica, en el Golfo de Cádiz y cercano al Estrecho de Gibraltar (Figura 3.1). Las playas incluidas están orientadas, en su mayoría, hacia la vertiente atlántica:

- **La Ballena**, en el T.M. de Rota (Figura 3.2).
- **Valdelagrana**, en el T.M. de El Puerto de Santa María (Figura 3.3).
- **Río San Pedro**, en el T.M. de Puerto Real (Figura 3.4).
- **Victoria**, en el T.M. de Cádiz (Figura 3.5).
- **Camposoto**, en el T.M. de San Fernando (Figura 3.6).
- **La Fontanilla**, en el T.M. de Conil de la Frontera (Figura 3.7).
- **El Palmar**, en el T.M. de Vejer de la Frontera (Figura 3.8).

Por el contrario, la playa de **La Atunara**, en el T.M. de La Línea de La Frontera (Figura 3.9), se encuentra orientada hacia la vertiente mediterránea, junto al Peñón de Gibraltar.

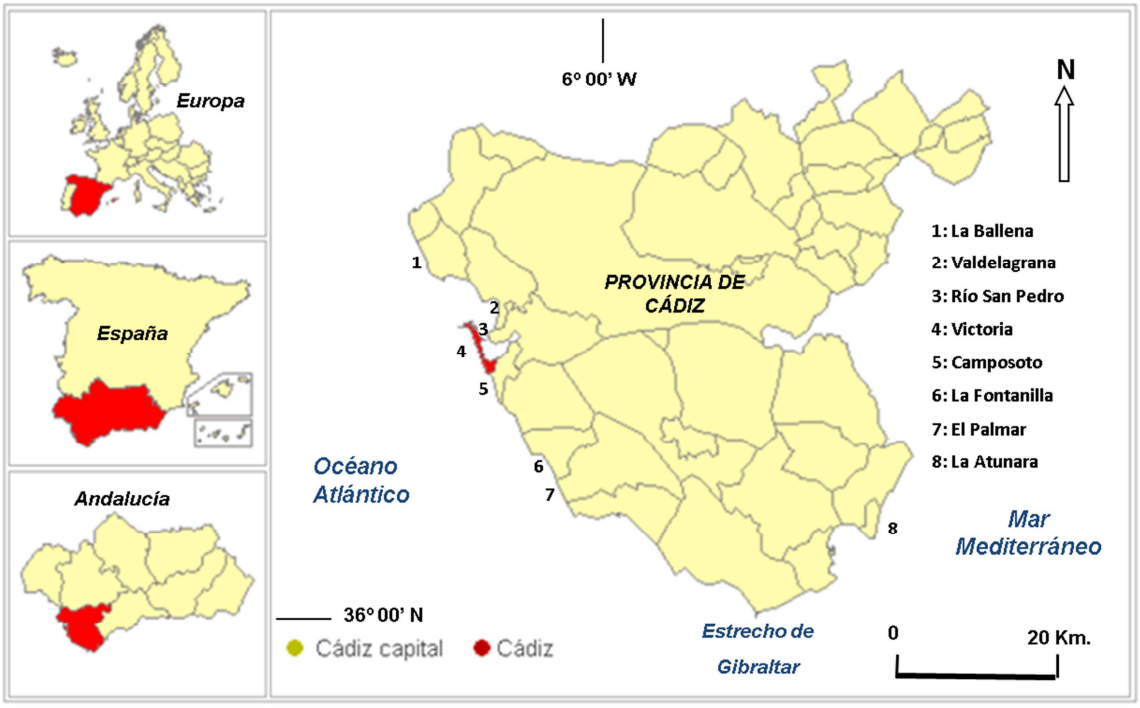


Fig. 3.1. Localización geográfica del litoral de la provincia de Cádiz y playas estudiadas.(Fuente: Adaptado de la web del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo, Junta de Andalucía, 2013).

Fig. 3.2. Vista aérea de la playa de La Ballena, T.M. Rota. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.3. Vista aérea de la playa de Valdelagrana, T.M. Puerto Sta. María. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.4. Vista aérea de la playa del Río San Pedro, T.M. Puerto Real. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.5. Vista aérea de la playa Victoria (apoyada en paseo marítimo), T.M. Cádiz. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.6. Vista aérea de la playa de Camposoto (con presencia de cordón dunar), T.M. San Fernando. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.7. Vista aérea de la playa de La Fontanilla (con el puerto pesquero-deportivo al fondo), T.M. Conil de la Frontera. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.8. Vista aérea de la playa de El Palmar, T.M. Vejer de la Frontera. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

Fig. 3.9. Vista aérea de la playa de La Atunara (con el puerto deportivo en primer plano y Gibraltar al fondo), T.M. La Línea de la Concepción. (Fuente: Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente).

3.2. Principales sistemas de playa y tipos de arena.

El Golfo de Cádiz presenta una dinámica litoral controlada por los temporales dominantes de poniente, que generan corrientes de deriva litoral hacia el SE, como ponen de manifiesto las numerosas flechas y playas existentes en la zona (Gutiérrez-Más et al., 1994). La plataforma del Golfo de Cádiz está afectada por la corriente de agua superficial

noratlántica, que la barre con dirección SE, siendo la responsable del transporte de los sedimentos finos aportados por los cursos fluviales, principalmente del río Guadalquivir (Gutiérrez-Más et al., 1994).

En términos territoriales, la costa gaditana abarca desde la desembocadura del río Guadalquivir en el océano Atlántico hasta el término municipal de San Roque, en el mar Mediterráneo, lindando con la provincia de Málaga al Este. La configuración de este espacio, donde la presencia de las cordilleras Béticas se deja sentir notablemente a través de un conjunto de Sierras perpendiculares a la línea de costa (pertenecientes a las Unidades de Flyschs del Campo de Gibraltar), se articula según la alternancia de cabos y promontorios que penetrando en el mar individualizan zonas deprimidas donde la transgresión flandriense (14.000 – 6.000 aC.) penetró conformando pequeñas ensenadas, a veces aprovechando el cauce de algunos ríos significativos (Gutiérrez-Más et al., 1993). Se configuró así una costa recortada donde el oleaje atacaba enérgicamente los cabos y los sedimentos eran transportados por las derivas hacia el interior de las ensenadas, en las que junto a la aportación de sedimentos continentales por la red hidrográfica, se desarrollaron un conjunto de cordones dunares litorales con morfología curva, enmarcadas en ensenadas dificultando a veces la desembocadura de pequeños ríos, algunos de los cuales drenan por infiltración (Villalobos et al., 2009).

En estas condiciones, el progreso dio como resultado una costa totalmente diferente a la que generó la transgresión flandriense, una costa ahora próxima a su perfil de equilibrio (Villalobos et al., 2009). Con ello, desde la perspectiva dinámica, en la costa andaluza occidental, hacia mitad del siglo XX, se podían individualizar claramente dos sectores, uno perteneciente a la costa de Huelva y su prolongación hacia Portugal y otro el de la costa gaditana, donde además se podía distinguir el sector de la Bahía de Cádiz y el sector cabo de Roche – Tarifa. A partir del área de Conil, la costa ha sido trazada, en líneas generales, por la actividad tectónica reciente (Gutiérrez-Más et al., 1991). El perfil costero recorre un zig-zag en líneas conectadas con las direcciones principales de fractura (Figura 3.10). Los bloques individualizados por el sistema de fallas han sufrido una serie compleja de movimientos diferenciales de elevación, hundimiento y basculamiento. Los procesos sedimentarios cuaternarios han ido rellenando entrantes y suavizando salientes, pero la forma de la línea costera, constituye aún, fundamentalmente, un reflejo de la tectónica.

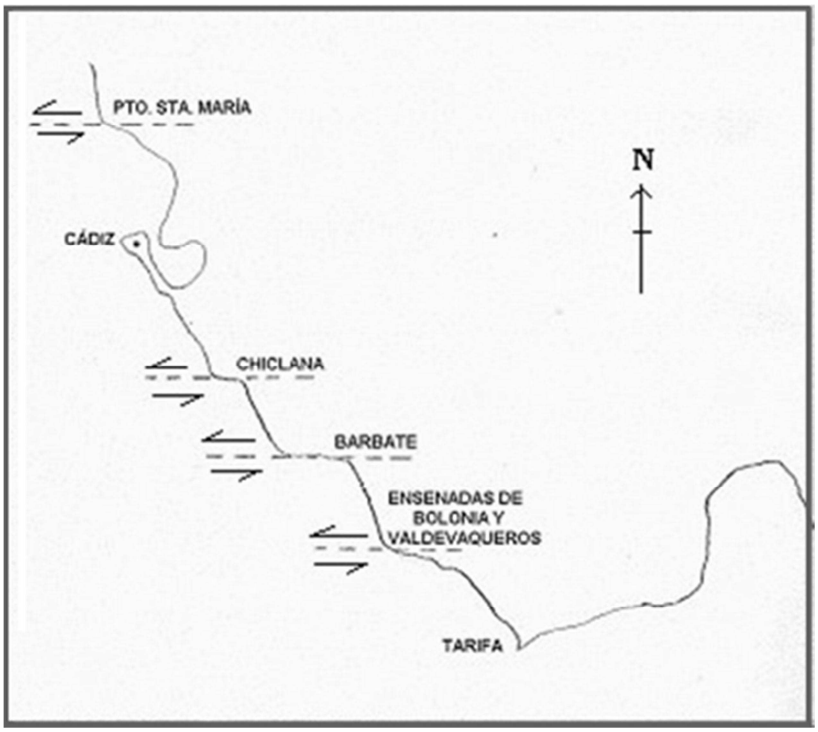


Fig. 3.10. Esquema del escalonamiento del litoral de Cádiz producido por series de fallas transversales. Fuente (Gutiérrez-Más, 1991).

A lo largo del litoral gaditano aparecen diversos tipos de ambientes costeros (Del Río y Gracia, 2007), tanto deposicionales (playas y dunas, marismas, estuarios) como erosivos (acantilados y costas rocosas en general, donde se incluyen las plataformas de abrasión y los corrales que en ella se construyen). De las citadas, el ámbito de actuación del presente proyecto se ciñe al ámbito de las playas y dunas anexas, cuyas características generales son las siguientes:

- Playas: Generalmente, las playas son dominantes en la mitad norte de la costa gaditana, con un carácter preferentemente disipativo y controladas por los temporales. El escalonamiento morfoestructural de la costa da lugar a diversas bahías y ensenadas, en las que se instalan desembocaduras fluviales (Gutiérrez-Más, 1991 y Villalobos et al., 2009). Este control morfológico unido a la deriva litoral origina la formación de flechas que crecen hacia el SSE, formadas desde mediados del Holoceno (Valdelagrana, Cádiz-San Fernando, Sancti-Petri, Barbate, Bolonia, Valdevaqueros y los Lances). Fundamentalmente su desarrollo longitudinal va disminuyendo hacia el Estrecho de Gibraltar.
- Dunas: Las dunas son consideradas como la reserva natural de arena de las playas, estando el sistema playa-duna íntimamente ligado. Por lo general, en las dunas del litoral gaditano se manifiesta una dualidad de vientos poniente-levante. Las dunas de

poniente forman cordones dunares detrás de las playas principales, con un desarrollo generalmente modesto. Por su parte, las dunas de levante sólo se forman en los entrantes costeros y ensenadas en las que el viento de levante es capaz de arrastrar arena desde playas colindantes. Forman complejos dunares de enormes dimensiones (Román-Sierra et al., 2004) con una gran dinámica eólica (Navarro et al., 2011) y con un desarrollo especialmente importante en las proximidades del Estrecho de Gibraltar, donde la intensidad de los vientos del Este es máxima.

3.3. Estudios realizados en playas de la provincia de Cádiz.

En el caso concreto de la provincia de Cádiz, a lo largo de las últimas décadas se han efectuado numerosas regeneraciones en algunas de sus playas, propiciadas, en gran medida, por el retroceso generalizado de la línea de costa debido a la erosión costera y también por la demanda social generada por las necesidades recreativas, de ocio y de disfrute de un turismo en expansión. Desde los años 50 hasta la fecha, la importancia del sector turístico en España se ha ido incrementando de manera permanente (Muñoz-Pérez et al., 2001). Lamentablemente, diversos estudios han demostrado que el litoral gaditano se encuentra en continua recesión (Reyes et al., 1997; Benavente et al., 2005; Anfuso y Gracia, 2005; Anfuso et al., 2007; Muñoz-Perez et al., 2007), llegándose a calcular retrocesos medios de hasta un metro por año en el tramo de costa entre Chipiona y Rota (Muñoz-Pérez y Enríquez, 1998). La alarma social generada ha conducido a una preocupación por encontrar soluciones a la problemática de la erosión costera que pasan, por las técnicas blandas de ingeniería como las realimentaciones de playa con arena procedentes de placeres marinos o canteras terrestres (playas relictas).

Como se ha descrito anteriormente, la línea de costa en la provincia de Cádiz ha estado en recesión al menos durante el último siglo. Los fenómenos de subsidencia, el aumento paulatino del nivel del mar, la regulación de los ríos mediante presas y las estructuras dispuestas en el litoral son la principal causa (Muñoz-Pérez et al., 2001). Los principales problemas de erosiones de playa, han sido solventados mediante regeneraciones de playas a lo largo de la costa del Golfo de Cádiz. Sólo durante la década de los 90, se usaron más de 12 millones de metros cúbicos de arena para realimentar diversas playas del litoral de Huelva y Cádiz. En este contexto, la costa de la provincia de Cádiz presenta una amplia variedad de problemas de ingeniería de costas y gestión litoral de difícil arreglo (Gómez-Pina et al., 2002). La solución no es fácil de obtener debido a la complejidad de

parámetros intrínsecos como: una singular morfodinámica litoral debida a la presencia de lajas rocosas, corrales de pesca y áreas rocosas; altas tasas de erosión de sistemas dunares; urbanización y posterior ocupación de los sistemas dunares anexos a la playa (que actúan de reservorio de arena de éstas últimas) anteriores a la aprobación de la Ley de Costas (1988), y alto desarrollo turístico en el litoral gaditano. Además, existe cierta oposición de los pescadores locales sobre la utilización de los placeres existentes en la provincia que contienen una arena de excelente calidad en cuanto a su granulometría y composición mineralógica (Gómez-Pina et al., 2006).

3.3.1. Clasificación de las playas estudiadas

En el litoral de la provincia de Cádiz, encontramos diferentes tipologías de playas marcadas entre otros aspectos por la composición de sus arenas. En la vertiente atlántica, encontramos playas muy afectadas por las mareas y el oleaje, de arena fina y muy homogénea en tamaño. Según la clasificación de playas presentada por Davies (1964), las playas estudiadas de la vertiente atlántica tienen un carácter mesomareal, con un rango mareal máximo de 3,6 m en mareas vivas (Anfuso et al., 1999 y Aboitiz et al., 2008), siendo playas disipativas en su conjunto (Poizot et al., 2013). En la vertiente mediterránea, las playas se clasifican como micromareales (Davies, 1964), con un rango mareal máximo de 1,5 m (Román-Sierra et al., 2008), mostrándose como playas reflectivas según Masselink y Short (1993). Todas las playas estudiadas exhiben, una periodicidad mareal semidiurna.

3.3.2. Tipos de arena y composición mineralógica

Los sedimentos superficiales de los fondos de la plataforma continental septentrional del Golfo de Cádiz, se caracterizan por su bajo contenido en componentes orgánicos, excepto los carbonatos que se presentan en proporciones superiores al 20%. En este sector, los sedimentos superficiales presentan un claro carácter siliciclástico, reflejado por el alto contenido en cuarzo presente en las facies arenosas. En el caso del material que ocupa la mayoría de las playas situadas en el Golfo de Cádiz, el sedimento está compuesto por arenas medias de composición mineralógica variada, consistiendo mayoritariamente en sílice en forma de cuarzo en un 90% y el resto carbonatos en forma de material bioclástico y feldespatos (Muñoz-Pérez, 1996). Algunas de estas playas tanto emergidas como sumergidas están compuestas también por fragmentos de conchas de restos de organismos vivos (bioclastos) que pueden influir en las propiedades físicas del sistema intersticial del sedimento (McLachlan and Turner, 1994). En la vertiente mediterránea, encontramos playas

micromareales muy afectadas por la acción erosiva del oleaje generalmente formadas por arenas gruesas, tipo gravas y bolos.

En menor medida se encuentran otros minerales y metales pesados. En los sedimentos fango-arcillosos, sin embargo, el mineral mayoritario es la ilita. Otros componentes como materia orgánica, fósforo, nitrógeno y pigmentos se encuentran en cantidades muy pequeñas y asociados siempre a sedimentos de granulometría fina (Gutiérrez-Más et al., 1994).

3.4. Clima atmosférico y marítimo de la provincia de Cádiz.

El clima de la provincia de Cádiz es típicamente mediterráneo, caracterizado por la distribución de temperaturas y precipitaciones a lo largo del año. La coincidencia estival de altas temperaturas y la ausencia de lluvias es un rasgo definitorio de este clima, del que deriva su acusado déficit hídrico. Sin embargo, este clima se encuentra condicionado por una serie de fenómenos que le otorgan una personalidad propia. Estos factores son, por un lado, aspectos geográficos o estáticos como la latitud, en el extremo meridional de la Península, el relieve, que explica el régimen de lluvias y los fuertes vientos, y por último, la influencia del mar, por su efecto termorregulador del clima. Por otro lado tenemos los factores dinámicos, que dependen de la dinámica general de la atmósfera de la zona, y nos explican los ritmos estacionales y los tipos de tiempo que se generan en la provincia, encontrándose éstos íntimamente relacionados con las masas de aire atmosférica que rigen el clima gaditano como el anticiclón de las Azores, las masas de aire tropical continental, las de aire marítimo polar, el frente atlántico-mediterráneo y el frente euroafricano.

El régimen de temperaturas en la provincia de Cádiz se caracteriza fundamentalmente por su carácter suave y moderado. Las variaciones espaciales son debidas principalmente a características geográficas como la cota sobre el nivel del mar y la influencia del mar.

La precipitación media anual en la mayor parte de la provincia de Cádiz es superior a los 600 mm, si bien cabe destacar que en algunas zonas de la Sierra de Grazalema se superan los 2000 mm, debido a sus peculiaridades orográficas y geográficas, mientras que en la zona más occidental de la provincia escasamente se superan los 500 mm de pluviosidad.
El viento es un elemento muy característico de la provincia, sobre todo en el Sur y la mitad occidental. Los más frecuentes son los de componente Oste o Poniente, y el llamado Levante de componente Este o Sureste. Los vientos de poniente son húmedos y frescos, y

originan precipitaciones. El viento de levante se origina en la depresión sahariana, siendo por tanto cálido y seco, al ser su recorrido sobre el mar muy reducido. Este viento pasa con bastante fuerza por la zona del Estrecho, al actuar este como un embudo, provocando una importante aceleración y una turbulencia extraordinaria con velocidades medias de 36Km/h y rachas que llegan a alcanzar hasta los 150 Km/h. Produce humedades y neblinas en las sierras del Campo de Gibraltar, pero al perder la humedad se convierte pronto en muy desecante (Diputación de Cádiz, 2013).

En cuanto al clima marítimo, habitualmente la energía del oleaje incidente puede considerarse como moderada-baja: la altura media de las olas de mar de viento y de mar de fondo es de 1 m, y la altura significante durante los temporales es de 2 m, con un período asociado de 7 seg (Ranguel-Buitrago y Anfuso, 2013 y Puertos del Estado, 2013). La dirección de aproximación del oleaje, tanto en el caso de temporales como durante el buen tiempo, generalmente es la Oeste, con un 45% de aparición anual.

CAPÍTULO CUARTO

METODOLOGÍA APLICADA ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE UNA REGENERACIÓN DE PLAYA

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA APLICADA ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE UNA REGENERACIÓN DE PLAYA

4.1. Metodos de regeneraciones de playa

En función del origen de la arena de préstamo y de la playa a regenerar, el método empleado ha sido el de la draga marina o el de la maquinaria terrestre (palas, camiones y traillas). La realimentación de playas mediante vertido de arenas de procedencia marina (bancos o placeres), es una de las técnicas más utilizadas en la recuperación de la costa. Dada la alta necesidad que existe de regeneración en la costa española (Muñoz-Pérez et al., 2003), el dragado marino se está volviendo, cada vez más, en el método más barato para proporcionar una gran cantidad de arena a las playas. Para una mayor eficiencia económica, en rendimiento, y menor impacto ambiental, la localización óptima de la zona de préstamo debe estar lo más cerca posible de la playa a regenerar para minimizar los costes de transporte y reducir la pluma de turbidez creada por los sedimentos en suspensión (Work et al., 2004 y Román-Sierra et al., 2011).

En el caso de la regeneración de la playa La Ballena, regenerada con arena de la cantera terrestre "El Palmar", el método empleado fue maquinaria pesada para la extracción y tratamiento de la arena en la cantera y para su posterior transporte, vertido y distribución sobre la playa (Figura 4.1). En el caso de playas Victoria y Camposoto, el método de regeneración fue mediante vertido directo por tubería a través de una draga marina, con arenas procedentes del dragado del Placer de Meca situado aproximadamente a 4-5 kilómetros mar adentro, al oeste del Cabo Trafalgar, (Román-Sierra et al., 2011). En el caso de las playas Fontanilla y Atunara, la arena se dragó en la bocana e inmediaciones de puertos pesquero-deportivos contiguos a las playas (Figuras 4.2 y 4.3).

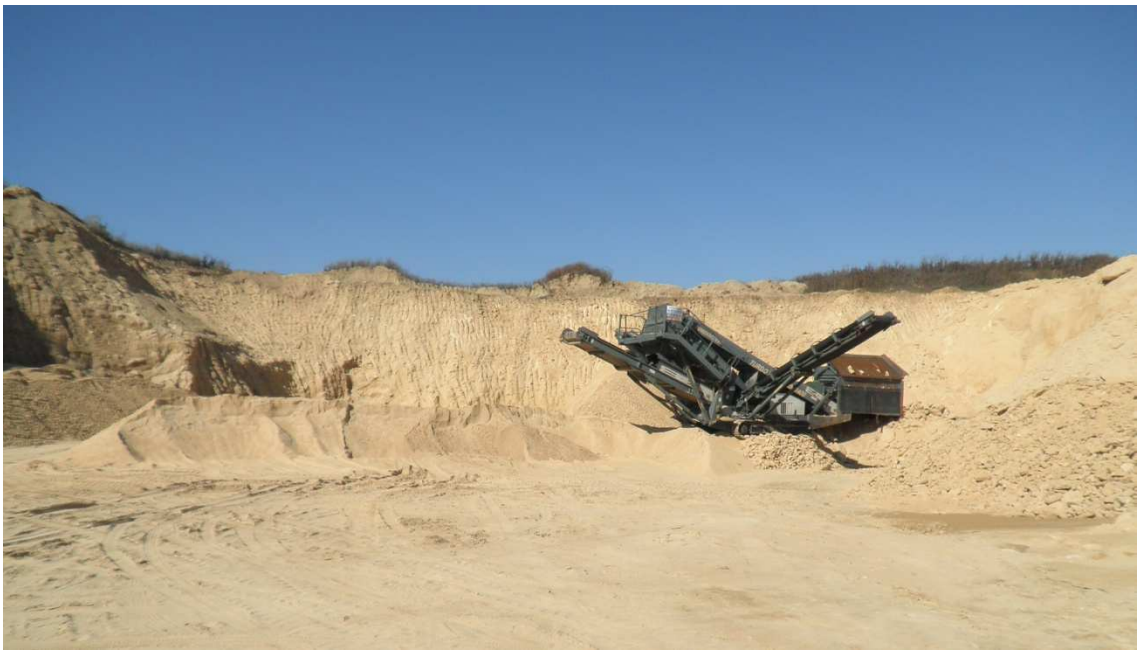


Fig. 4.1. Vista del frente de la cantera "El Palmar" (T.M. Arcos de la Frontera) y maquinaria.

Fig. 4.2. Vista de la draga "Adricristuy" dragando en el interior de la dársena del puerto deportivo de La Atunara.

Fig. 4.3. Vista del vertido de arena en la playa Atunara (izd.) e impulsión desde la draga (der.).

Las principales características de las campañas de regeneraciones de playa se basan en una serie de parámetros tales como: emplazamiento de la zona de dragado y vertido, el método de transporte, el presupuesto, el año, las características de la arena nativa y la de préstamo, y especialmente el volumen de arena vertido (CUR, 1987). Algunos de los proyectos de regeneraciones de playa han sido complementados, a veces, con la construcción de diques pequeños y permeables. Este método únicamente se ha llevado a cabo cuando se ha justificado una reducción importante del requerimiento anual de regeneración (Muñoz-Pérez et al., 2001).

El sistema habitual para la regeneración de una playa es por bombeo desde una draga. Para ello el sedimento se mezcla con agua de mar, en una proporción aproximada de un 20% de arena y un 80% de agua, convirtiéndolo en un fluido de densidad elevada. El exceso de agua permanece atrapado por la propia arena vertida, originando un gradiente negativo de presiones que se disipa en algunas horas. Mientras tanto, se produce un fenómeno de arenas movedizas debido a fluctuaciones del agua en el sedimento. Según Nielsen et al. (2001), los efectos de drenaje en el sedimento debidos a amplios gradientes de presión horizontales aún no han sido descritos, por lo que tienen que ser investigados. En este sentido, el sistema intersticial de las playas arenosas es donde ocurren los procesos de filtración de agua más importantes, además de tener sus dimensiones definidas por la granulometría de la arena, la porosidad, la permeabilidad y el contenido de agua (McLachlan and Turner, 1994). Estas propiedades son muy importantes en la modelización y la predicción del comportamiento del sedimento, así como otras propiedades geotécnicas, sedimentológicas y biogeoquímicas. Según Reis y Gama (2010), la permeabilidad de la arena puede ser correlacionada con el tamaño de grano, la esfericidad y la porosidad de la arena.

4.2. Metodología de la toma de datos de campo

En este apartado se describe la metodología practicada en la toma de datos de campo, tanto la elección de las playas a estudiar como los parámetros y factores a tener en cuenta. Asimismo, se realiza una breve descripción de la planificación seguida para realizar las diferentes campañas.

4.2.1. Justificación de la elección de playas

La toma de datos de densidad se ha previsto realizarlas a muy corto, corto, medio y largo plazo en varias playas del borde costero de la provincia de Cádiz. Dichas playas están ubicadas en diferentes ámbitos, sometidas a una diferente dinámica litoral: expuestas a mar abierto, abrigadas en una bahía o tras promontorios o puertos, con diferente orientación respecto al oleaje predominante, con presencia de paseo marítimo, cordón dunar, acantilado en retroceso por la erosión, etc. Otras playas están en la vertiente mediterránea con un régimen mareal muy diferente. Las playas en las que se ha estudiado finalmente la evolución de la densidad han sido sometidas a algún tipo de aportación de sedimento (realimentación) con el fin de conocer el cambio de porosidad que sucede en las playas cuando son regeneradas. De esta manera, el principal factor limitante que ha definido nuestro campo de estudio es el número y tipo de playas que han sido regeneradas durante la investigación, a criterio de la Administración Pública encargada de la ejecución de dichas obras. A finales del año 2009 y a principios del 2010, fuertes temporales azotaron la costa gaditana, provocando erosiones en diversas playas y fuertes tasas de retroceso de la línea de costa. Tras varias reuniones con los responsables encargados de las regeneraciones de playa en el litoral de la provincia de Cádiz (Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico, dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), se informó que llevarían a cabo diversas actuaciones de realimentación en varias playas, tanto con arenas de origen marino (Placer de Meca y Puertos) como arenas de origen terrestre (canteras). Cabe resaltar que entre todas las playas disponibles, se han seleccionado aquellas que presentaran aspectos diferenciados en cuanto a ubicación, exposición al oleaje, confinamiento, presencia de lajas rocosas, tamaño de grano, rango de marea, energía del oleaje, morfología y/o presencia de infraestructuras antrópicas. Dentro del marco litoral de la provincia de Cádiz, se ha tratado de realizar un estudio de al menos una playa de cada unidad fisiográfica: costa noroeste, bahía de Cádiz, la Janda y el Estrecho de Gibraltar en su vertiente mediterránea. De esta manera, las playas estudiadas han sido las siguientes:

Vertiente atlántica:

- La Ballena (T.M. Rota): Playa semi-urbana de arenas medias y presencia de acantilado en retroceso debido a la erosión.
- Valdelagrana (T.M. Puerto Sta. María): Playa urbana de arenas medias y presencia de paseo marítimo y asociada a una playa virgen (Playa de Levante).
- Victoria (T.M. Cádiz): Playa urbana de arenas medias, sin laja rocosa y presencia de paseo marítimo.
- Río San Pedro (T.M. Puerto Real). Playa semi-urbana de arenas medias y finas, confinada en la desembocadura del Río San Pedro.
- Camposoto (T.M. San Fernando): Playa natural de arenas medias con presencia de un cordón dunar estable y bien desarrollado.
- La Fontanilla (T.M. Conil): Playa semi-urbana de arenas medias con presencia de un puerto deportivo y un aparcamiento detrás de la playa.
- El Palmar (T.M. Vejer). Playa natural de arenas medio-gruesas, con un pequeño acantilado y cordón dunar en regresión por la erosión.

Vertiente mediterránea:

- La Atunara (T.M. La Línea de la Concepción): Playa urbana de arenas medias y gruesas con presencia de paseo marítimo, puerto deportivo y espigones transversales.

4.2.2. Parámetros a estudiar

Los parámetros a estudiar son los necesarios para evaluar de la forma más precisa la variabilidad de la porosidad de la arena de playa tras una regeneración. Dichos parámetros se han clasificado como intrínsecos (dependen directamente de la propia arena) o extrínsecos (dependen de factores externos a la propia arena), pudiendo afectar a la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Parámetros intrínsecos a la arena de playa:

- Granulometría.
- Densidad real.
- Densidad aparente.
- Porosidad.
- Humedad de la arena.
- Compactación máxima.

Parámetros extrínsecos a la arena de playa:

- Tipos de playas a regenerar
- Periodicidad de las campañas.
- Factores marinos: oleaje y mareas.
- Factores atmosféricos: viento y lluvia.
- Precisión del instrumental de medida.
- Metodología aplicada en campo y laboratorio.
- Análisis e interpretación de resultados.

4.2.3. Planificación de campañas

La planificación de las campañas se ha desarrollado en gran medida en función de los parámetros a estudiar descritos en el apartado anterior. También ha estado sometida a la baja periodicidad de las regeneraciones de playa efectuadas por la Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico en el litoral de la provincia de Cádiz. En condiciones normales, la línea de investigación seguida se resume en los siguientes aspectos: Recopilación bibliográfica y de información, recopilación de datos propios en cada playa, análisis y parametrización de los indicadores, extracción de resultados y discusión, publicación de los hallazgos y redacción de la Memoria de Tesis.

Como paso anterior a la toma de datos, se ha procedido a la recopilación bibliográfica e investigación del estado del arte. Se ha recogido la mayor información disponible al respecto en administraciones públicas y empresas privadas, así como búsqueda y lectura de otras investigaciones científicas relacionadas.

La recopilación de datos propios se ha efectuado en cada una de las playas a estudiar. Entre otros aspectos, por orden de establecimiento, los pasos a seguir han sido los siguientes:

- Estudio de arenas medias litorales, antes, durante y tras una regeneración de playa:
  - Estudio granulométrico y composición mineralógica del sedimento.
  - Estudio de la densidad y porosidad del material de playa.
- Publicación de los hallazgos para la optimización de las técnicas en las regeneraciones de playas.

Para tal fin, se han realizado diversas campañas de análisis granulométricos y determinación de la densidad y porosidad a diferentes escalas de tiempo: muy corto (horas), corto (días), medio (meses) y largo plazo (años) en la zona nativa (playa). También se han realizado dichos controles en la cantera terrestre (como ha sido en el caso de la regeneración

de la playa de La Ballena) y por limitaciones tecnológicas, sólo análisis granulométricos en las zonas de préstamo submarinas.

Para cada una de las playas estudiadas, se ha seguido un procedimiento metodológico, realizando las siguientes campañas:

- Muy corto plazo: Medidas horarias de la variación de porosidad en un perfil transversal durante una vaciante de marea (6 horas) para estudiar el efecto de la percolación del agua una vez la playa ha sido regenerada. Recogida de muestras de sedimento.
- Corto plazo: Medidas diarias desarrolladas antes y durante los procesos de regeneración. Se han realizado controles granulométricos, así como de densidad y porosidad:
    - De la arena nativa de la playa antes de la regeneración. Medidas de porosidad de la arena en la zona de préstamo.
    - Justamente tras el vertido.
    - Tras el paso de las primeras mareas.
- Medio plazo: Campaña de seguimiento desarrollada durante los meses siguientes a la regeneración, realizando controles granulométricos, de densidad y de porosidad:
    - Tras el paso de varias mareas, incluyendo las equinocciales.
    - Medidas tras el paso de temporales con una altura de ola significante (H_s) superior a 3 m.
- Largo plazo: Campaña de control de larga evolución sedimentológica durante los años 2010 y 2013.
    - Análisis granulométricos y medidas de densidad y porosidad en los perfiles de playa a partir de 12 meses tras el vertido de arena.

Las mediciones en las playas se realizaron en perfiles transversales a la línea de costa. En cada playa se trazaron, en función de su naturaleza, 2 ó 3 perfiles transversales y se realizaron medidas en la parte alta de la playa o zona seca (A), en la zona media del intermareal (M) y en la zona más cercana a la bajamar (B). Cabe destacar que el densímetro nuclear no funciona en contacto directo con el agua, por lo que todos los ensayos en bajamar (B) fueron realizados en la zona más cercana posible al agua (Figura 4.4).

En el caso de la playa Victoria, debido a la formación de una gran berma tras la regeneración, se decidió tomar un punto extra en cada perfil (Mberm).

Asimismo, en la playa Atunara, dado su carácter micromareal y reflectivo, y el recorrido horizontal de la carrera de marea es comparativamente mucho menor (10-20

metros) que en las playas atlánticas (50-100 metros), por lo que la estación intermareal (M) y bajamar (B) se encuentran relativamente cercanas entre sí.

En la playa de La Ballena, regenerada con arenas procedentes de cantera terrestre, se planificó un estudio de densidad, humedad, porosidad y ensayo Proctor modificado en la zona de préstamo, tanto en la arena compactada en el frente de cantera, como en la arena suelta ya tratada por la maquinaria (Figura 4.1).

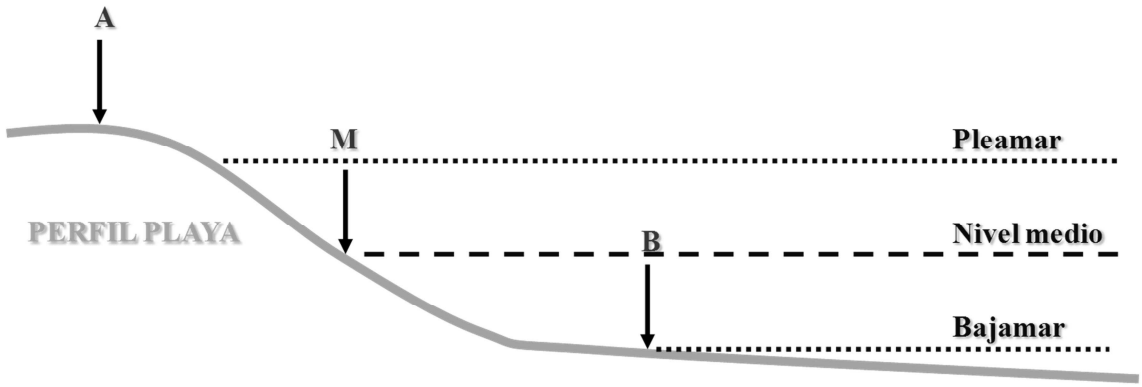


Fig. 4.4. Esquema del perfil transversal de playa y localización de la zona de muestreo: A (playa emergida), M (intermareal) y B (próximo a la bajamar).

Los trabajos de gabinete son los llevados a cabo una vez tomados los datos propios en campo y realizados los análisis correspondientes en el laboratorio. Concretamente, han comprendido las siguientes acciones:

- Extracción de resultados, parámetros y discusión.
- Redacción de informes de resultados y publicación de artículos científicos.
- Redacción de la Memoria de Tesis.

El cronograma de trabajos (Tabla 4.1) fue desarrollado en un periodo máximo de 36 meses (3 años). Dicho periodo fue dividido en cuatro trimestres por año (T1, T2, T3 y T4) con el fin de distribuir y reconocer cada una de las labores descritas en una adecuada escala temporal.

Tabla 4.1. Cronograma de trabajo.

	AÑO 1				AÑO 2				AÑO 3			
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-1	T-2	T-3	T-4	T-1	T-2	T-3	T-4
Acción 1												
Acción 2												
Acción 3												
Acción 4												
Acción 5												
Acción 6												

- Acción 1: Recopilación bibliográfica y de información existente.
- Acción 2: Mediciones en playas*.
- Acción 3: Recopilación y análisis de los indicadores estudiados.
- Acción 4: Extracción de resultados y discusión de mejoras técnicas
- Acción 5: Redacción de informes y artículos
- Acción 6: Redacción de la memoria de Tesis.

*Nota: El periodo de muestreo e inicio de los trabajos en campo siempre ha estado supeditado a los procesos erosivos de la costa y en concreto a la ejecución de las obras de regeneraciones de playa por parte de la Administración Pública. Por dichos motivos, este cronograma de trabajo tiene un carácter exclusivamente orientativo.

4.3. Caracterización granulométrica del sedimento.

Para la determinación del tamaño medio de grano en las diferentes playas estudiadas, se tomaron 3 muestras en distintos puntos del perfil transversal coincidiendo con las medidas de densidad: en la playa seca (A), en la mitad del recorrido de la zona intermareal (M) y en la zona más próxima a la bajamar (B). En el caso de la playa Victoria, se tomó un punto extra en la berma de cada perfil (Mberm). Con la finalidad de determinar el tamaño medio de grano de las muestras de sedimento recogidas en cada playa, se han descrito las metodologías de muestreo en campo, análisis en laboratorio y cálculo de parámetros estadísticos en gabinete.

4.3.1. Metodología de muestreo

La metodología de muestreo en campo se ha realizado siguiendo la metodología descrita por Larson et al. (1997) y USACE (2002). Se ha procedido a la cata de muestras de arena en las estaciones definidas a lo largo de los perfiles transversales de las playas estudiadas, tomando un volumen suficiente de arena homogeneizado no inferior a 500 grs por muestra y transportada al laboratorio. El material necesario ha consistido en una pala de mano, bolsas con cierre hermético rotuladas, cinta métrica, GPS y cámara fotográfica.

4.3.2. Metodología de análisis en laboratorio

Todos los análisis han sido realizados según las normas estándares de ensayo según las Recomendaciones Generales para el Material Dragado del CEDEX (1994) y según el procedimiento analítico y metodológico especificado por los principios, métodos y aplicaciones de análisis de partículas de sedimento según la norma de ensayo UNE 103101 (1995), así como en Syvitski et. al, (1991), USACE (2002) y Román-Sierra et al. (2013).

Una vez en el laboratorio, las muestras de arena se lavan con agua oxigenada al 18%, por cada 30 gramos de muestra. Tras la peroxidación de la materia orgánica presente, se secan en horno a 110º C durante 12 h. y posteriormente se pesan. Se pasa toda la muestra por el tamiz de 0,075 mm, el cual separa la arena de los limos y arcillas (finos). El sedimento que ha pasado a través de ese tamiz se recoge en un recipiente, se seca a 110º C y se pesa el contenido en finos de la muestra. El resto de arenas medias, se seca de nuevo y se ha anota el peso inicial. Una vez hecho esto, se pasa por una columna de varios cedazos dispuestos ordenadamente en una columna de mayor a menor luz de malla (UNE 103101, 1995) y se tamiza electromagnéticamente a 300 golpes por minuto y 2,6 rotaciones por minuto (Figura 4.5). El diámetro de grano está determinado por el tamaño de luz de malla que no permite que pase al tamiz inferior al realizar un análisis granulométrico. La distribución de los diferentes tamaños de grano se obtiene del peso del sedimento retenido en cada tamiz, mientras que la suma de todos los pesos retenidos en cada tamiz constituye el peso final, y son utilizados para el cálculo de todas las variables estadísticas. Las luces de malla empleadas en el análisis granulométricos de esta investigación han sido: 2,0 - 1,0 - 0,71 - 0,5 - 0,35 - 0,25 - 0,125 y 0,075 mm. Posteriormente, cada valor en peso se ha representado en una gráfica semilogarítimica o logarítmica normal. Tras el análisis granulométrico se pueden obtener los principales parámetros estadísticos (D_{50}, *sorting*, *skewness* y *kurtosis*).

Fig. 4.5. Tamizadora electromagnética y columna de tamices utilizados.

Diversos estudios han evaluado la eficiencia del tamizado en relación al tiempo de análisis efectuado, con la hipótesis principal de que cuanto mayor sea el tiempo de tamizado, mayor será la probabilidad de que los granos de arena vayan pasando a lo largo de los diferentes tamices hasta alcanzar la luz de malla mínima que los contenga. En este sentido, algunos autores han estimado diferentes tiempos mínimos de tamizado de 20 minutos (Syvitski, 1991) o 15 minutos (USACE, 2008), pero no han evaluado la confianza de dichos análisis. Puede establecerse como conclusión general, y según los resultados publicados en Román-Sierra et al. (2013), que con 10 minutos de tamizado es suficiente para realizar análisis granulométricos fiables en arenas medias de playa y duna, asumiendo errores relativos despreciables.

4.3.3. Clasificación de sedimento por tamaño

Una de las más importantes características del sedimento es el tamaño de las partículas (USACE, 2002). El tamaño de la partícula es definido usualmente en términos de su diámetro, aunque la irregularidad de las formas de grano hace que el término diámetro pueda ser ambiguo. Debido a los diferentes tamaños de grano de los que está compuesto el sedimento, es necesaria la clasificación del mismo por tamaño.

4.3.3.1. Clasificaciones y unidades de medida.

Los sedimentos son normalmente clasificados en función de su proporción de contenido en arenas, fangos y limos (Shepard, 1954). Con el objetivo de comparar distintas arenas, las distribuciones del tamaño de grano se describen frecuentemente por su desviación respecto a una distribución ideal pre-establecida (distribución normal o Gaussiana). La escala geométrica se utiliza normalmente para tratar de otorgar la misma importancia a las pequeñas diferencias existentes entre las partículas finas, que a las grandes diferencias entre partículas gruesas. Sin embargo, la clasificación más usada internacionalmente (Tanner, 1969; Friedman y Sanders, 1978) es la basada en la transformación logarítmica (en base 2) de la escala milimétrica (Wentworth, 1922) (Tabla 4.2), la cual fue expresada matemáticamente por Krumbein (1936) mediante la "escala phi". La expresión matemática de esta "escala phi" (φ) es:

$$D\,(\varphi) = -\log_2 d\,(mm) \tag{4}$$

E inversamente:

$$d\,(mm) = 2^{-D(\varphi)} \tag{5}$$

Donde D es el diámetro de grano en unidades phi y d es el diámetro de grano en milímetros.

Tabla 4.2. Diferentes clasificaciones del tamaño de grano. (Fuente: Wentworth, 1922).

Clasificación Wentworth	Tamaño (mm)	Tamaño (φ)	U.S. Std. Sieve
Grava	>2.000	<-1.0	<10
Arena muy gruesa	2.000–1.000	0.0	10–40
Arena gruesa	1.000–0.710	0.5	
	0.710–0.500	1.0	
Arena media	0.500–0.355	1.5	40–200
	0.355–0.250	2.0	
Arena fina	0.250–0.125	3.0	
Arena muy fina	0.125–0.063	4.0	
Limo y arcilla	<0.063	>4.0	>230

4.3.3.2. Tamaño medio de grano (D_{50}).

El tamaño medio de grano (D_{50}) es el diámetro por el cual el 50% del sedimento, en peso, tiene un tamaño menor. Es decir, es aquel diámetro que tiene un 50% de los granos con menor tamaño y otro 50% con tamaño mayor. Este valor se obtiene tras el análisis granulométrico mediante tamizado. De igual modo, el D_{84} es el diámetro de grano que tiene un 84% de granos con menor tamaño y un 16% mayor.

A lo largo de esta Tesis se ha desarrollado un programa de elaboración propia, el cual proporciona de una forma sencilla a través de una hoja de cálculo de la aplicación Microsoft Excel©, una serie de valores matemáticos y parámetros estadísticos con sus correspondientes gráficos (Figura 4.6). Tras el tamizado y pesado por vía seca, el programa proporciona variables como: el peso de cada tamiz; porcentaje retenido; peso inicial y final; fiabilidad del análisis; porcentaje retenido acumulado y material que pasa; curva granulométrica; e histograma con línea de tendencia para cada una de las fracciones del sedimento. Entre otros parámetros, destacan la media (M), la moda y el tamaño medio de grano (D_{50}). También se obtienen otros momentos estadísticos de orden mayor como la desviación típica (*sorting*), el grado de simetría (*skewness*) y el grado de concentración (*kurtosis*). Asimismo se calculan los percentiles acumulativos (D_{95}; D_{84}; D_{75}; D_{25}; D_{16}; D_5 en unidades milimétricas y sus respectivos φ_{95}, φ_{84}, φ_{75}, φ_{25}, φ_{16}, φ_5 en unidades phi) que marcan el diámetro de la luz de malla por el que pasa el tanto por ciento descrito de la muestra. Estas variables son de gran importancia para el cálculo posterior de parámetros de ingeniería útiles para regeneraciones de playa. Asimismo, el programa refiere otro tipo de datos descriptivos de la zona de muestreo, coordenadas geográficas, nombre de la muestra, observaciones realizadas durante el muestreo, fecha, etc. (Figura 4.6).

TÍTULO: Regeneración playa

Coordenadas UTM ED50 — X: — Y:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

MUESTRA:	Estación B3		Fecha	
Peso inicial muestra	131,17	gr.	Peso (gr)	% Peso
>2 mm	3,85	gr.	3,85	2,94
2--1	9,39	gr.	9,39	7,16
1--0,71	8,46	gr.	8,46	6,45
0,71--0,5	17,41	gr.	17,41	13,27
0,5--0,355	26,63	gr.	26,63	20,30
0,355--0,250	27,95	gr.	27,95	21,31
0,250--0,125	32,85	gr.	32,85	25,04
0,125--0,075	4,6	gr.	4,6	3,51
<0,075 mm	0,02	gr.	0,02	0,02
			131,16	99,99
Peso final muestra	131,16	gr.		
% FIABILIDAD	99,99			

Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa
2	2,94	2,94	97,06
1	7,16	10,09	89,91
0,71	6,45	16,54	83,46
0,5	13,27	29,82	70,18
0,35	20,30	50,12	49,88
0,25	21,31	71,43	28,57
0,125	25,04	96,47	3,53
0,075	3,51	99,98	0,02
0	0,02	99,99	0,01

Variable	Valor	Variable	Valor
D50 (mm)	0,35	Φ50	1,51
D84 (mm)	0,73	Φ84	0,45
D16 (mm)	0,19	Φ16	2,42
D95 (mm)	1,71	Φ95	-0,78
D5 (mm)	0,13	Φ5	2,92
D75 (mm)	0,54	Φ75	0,90
D25 (mm)	0,23	Φ25	2,11
Moda (mm)	0,12	M(Φ)	1,46
% Gruesos	2,94	θΦ (sorting)	1,11
% Arenas	97,04	αΦ (skewness)	1,79
% Finos	0,02	KΦ (kurtosis)	1,26

Observaciones: Arena bien clasificada, de color dorado, muy sesgada en gruesos, de distribución leptocúrtica.

Firma:

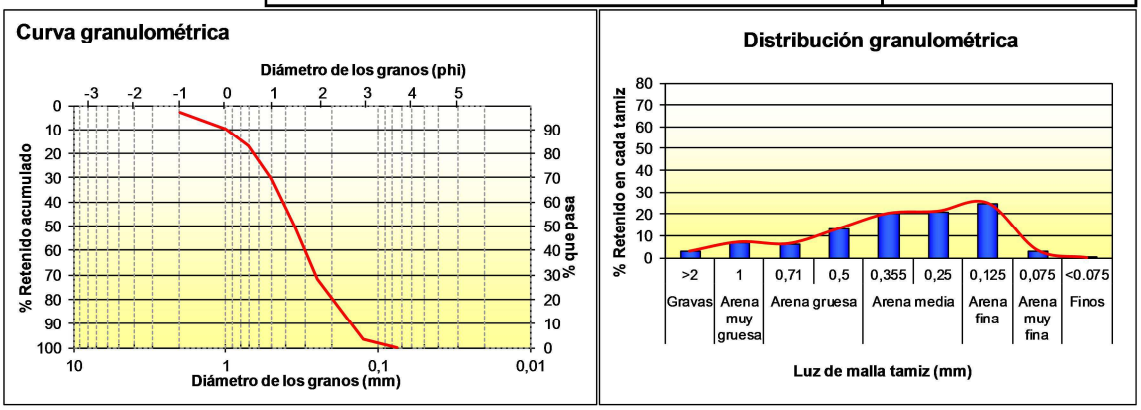


Fig. 4.6. Ejemplo de la plantilla utilizada para el tratamiento de los datos obtenidos tras el análisis granulométrico.

4.3.3.3. Desviación típica (sorting).

La desviación típica o *sorting* se utiliza para estudiar cómo la muestra varía desde una distribución logarítmica normal. Es una medida del grado de desviación respecto a la media, indicando el grado de clasificación del sedimento. Según Folk (1974) y USACE (2002), la desviación típica puede aproximarse por:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{(\varphi_{84} - \varphi_{16})}{4} + \frac{(\varphi_{95} - \varphi_{5})}{6} \qquad (6)$$

El sedimento está bien clasificado cuando todas las partículas tienen tamaños muy cercanos al valor medio (desviación típica pequeña). Si el sedimento cuenta con un gran número de tamaños diferentes, el sedimento está pobremente clasificado (USACE, 2002) y la desviación típica es elevada (Figura 4.7a).

4.3.3.4. Simetría (skewness).

El grado por el cual la distribución se aleja de la simetría pura es medido en unidades phi por el coeficiente de simetría o *skewness* y está definido según Folk (1974) como:

$$\alpha_{\varphi} = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2(\varphi_{50})}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_{5} - \varphi_{95} - 2(\varphi_{50})}{2(\varphi_{95} - \varphi_{5})} \quad (7)$$

Una distribución perfectamente simétrica tiene una simetría o *skewness* igual a cero (Figura 4.7b).

4.3.3.5. Apuntamiento (kurtosis).

El apuntamiento o *kurtosis* es una medida del achatamiento de la distribución, es decir de la proporción del sedimento en el centro de la distribución respecto a la presente en ambas colas (Figura 4.7c). Cuanto mayor sea el valor, más platicúrtica será la distribución. Según Folk (1974), se define como:

$$\beta_{\varphi} = \frac{\varphi_{95} - \varphi_{5}}{2,44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (8)$$

Asimismo, las correspondientes fórmulas pueden encontrarse en Folk y Ward (1957) y Blott y Pie (2001).

Valor (phi)	Desviación Típica (sorting)
<0,35	Muy bien clasificada
0,35 - 0,50	Bien clasificada
0,50 - 0,71	Moderadamente bien clasificada
0,71 - 1,00	Moderadamente clasificada
1,00 - 2,00	Pobremente clasificada
2,00 - 4,00,	Muy pobremente clasificada
>4,00	Extremadamente mal clasificada

	Simetría (skewness)
<-0,3	Sesgada en muy gruesos
(-0,3) - (-0,1)	Sesgada en gruesos
(-0,1) - 0,1	Simétrica
0,1 - 0,3	Sesgada en finos
>0,3	Sesgada en muy finos

	Apuntamiento (kurtosis)
<0,65	Muy platicúrtica
0,65 - 0,90	Platicúrtica
0,90 - 1,11	Mesocúrtica
1,11 - 1,50	Leptocúrtica
1,50 - 3,00	Muy leptocúrtica
>3,00	Extremadamente leptocúrtica

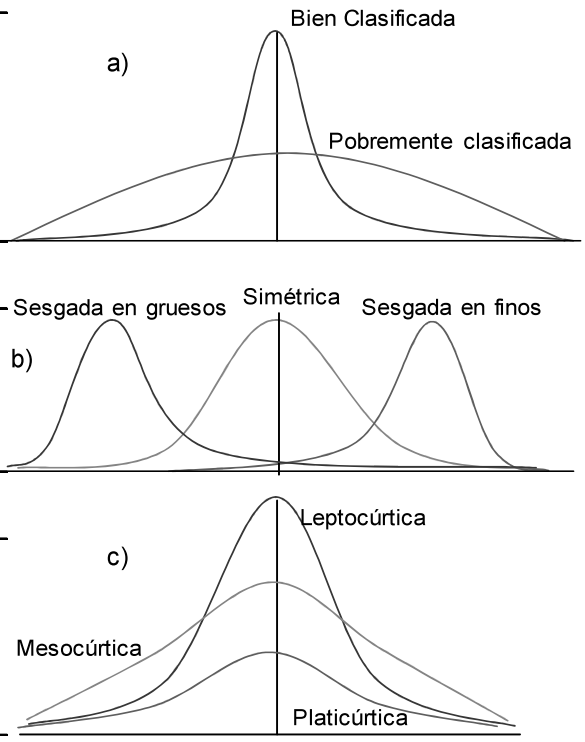


Fig. 4.7. Caracterización de la distribución del sedimento en función de los parámetros sorting, skewness y kurtosis. (Fuente: Adaptada de USACE, 2002).

4.4. Determinación de la densidad y porosidad de la arena de playa.

Según el capítulo III titulado "Coastal sediment properties" del Coastal Engineering Manual editado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2002), es esencial evaluar el comportamiento de los índices de granos y huecos en diferentes playas, especialmente antes y después de una regeneración de playa. En este sentido, el índice de huecos representa la porosidad del sedimento.

La densidad y la porosidad de la arena son propiedades geotécnicas esenciales en el entendimiento de la estructura interna del sedimento y su comportamiento en un medio dinámico como la costa o sistemas dunares. El seguimiento de la densidad, porosidad y tamaño de grano de la arena, así como la altura del oleaje, el nivel del mar y los levantamientos topográficos son cruciales para conseguir ese objetivo puesto que el clima marítimo puede cambiar la porosidad y el tamaño de grano del sedimento (Galofre et al., 1997; Muñoz-Perez y Medina, 2010 y Kakinoki et al., 2011). En sentido inverso, la influencia de la porosidad de la arena de playa sobre el flujo y reflujo del agua marina y

sobre la permeabilidad del sedimento fue también estudiada por Packwood (1983) y Reis y Gama (2010).

En trabajos previos, otros autores han desarrollado diferentes metodologías para la determinación de la densidad y porosidad del sedimento. Pryor (1973) usaba métodos volumétricos, mientras que Blake y Hartge (1986) medían la densidad de la partícula con un picnómetro o el método de sumersión. Además, Lundegard (1992) estimó cuantitativamente la cantidad de pérdida de porosidad mediante la compactación y la cementación. Por otro lado, Atkins y McBride (1992), Dickinson y Ward (1994) y Curry et al. (2004) estudiaron en laboratorio finas secciones de muestras de arena tomadas en campo e impregnadas en resinas y/o compuestos similares para su fijación y posterior traslado. Entre otras metodologías aplicadas por otros autores (Athy, 1930; Beard y Weyl, 1973; Roberts et al. 1998; Al-Shuely et al., 2010 y Kim et al., 2010), merece la pena mencionar el uso de tubos (cores) con sondas de conductividad instaladas o la técnica láser de rayos x en la Tomografía Computerizada (CT) desarrollada por Bloom et al. (2010) y Briggs et al. (2010).

En este sentido, Dickinson y Ward (1994) ya sugirieron la dificultad de obtener muestras de arenas sueltas in situ, cuya porosidad no se modificara en su traslado al laboratorio. En contraste con otras técnicas (Hamilton and Menard, 1956; Briggs, 1994; Tang et al. 2002 and Curry et al., 2004), con el densímetro nuclear no sucede la alteración de la estructura interna del sedimento. Este método no es sólo "no destructivo" de la muestra a medir sino mucho menos laborioso e intensivo (Gotthard, 1997 y Roberts et al. 1998). Este hecho es muy importante, puesto que la alteración de la estructura interna del sedimento en su cata y traslado al laboratorio puede suponer una compactación de los granos que supongan una reducción de la porosidad primaria (Chuhan et al., 2002), resultando en medidas erróneas.

En esta investigación, se han desarrollado una serie de metodologías para el cálculo de la densidad y porosidad con el fin de poder compararlas y seleccionar la técnica más precisa y eficiente que se disponga. Muchas de ellas, como se verá más adelante, son reguladas por normas UNE (Una Norma Española) y/o normas ASTM (American Society for Testing and Materials).

4.4.1. Métodos volumétricos y de pesada

Los métodos volumétricos para la determinación de la porosidad de la arena consistieron en tomar un volumen conocido de muestra lo más inalterada posible para su

posterior traslado al laboratorio donde se le aplicaron alguna de las metodologías volumétricas descritas a continuación.

4.4.1.1. Cores de PVC.

Como primer método de determinación de la porosidad de la arena, se eligió un tubo de PVC tipo core (Lanesky et al., 1979) con unas dimensiones de 11 cm de diámetro y 50 cm de largo. Estas proporciones tan elevadas fueron elegidas debido a la asunción que cuanto mayor fuera el volumen de arena tomado, menor sería el error relativo cometido posteriormente en las mediciones y análisis correspondientes de la porosidad. Este método se aplicó en la playa de La Fontanilla (T.M. Conil de la Frontera). Con el fin de conocer el volumen ocupado por el aire en los poros, se clavó completamente y de forma manual el tubo en la arena (volumen bruto de arena, aire y agua conocido). El volumen de la cavidad interior del tubo de PVC seleccionado era:

$$V_{tubo} = \Pi \cdot r^2 \cdot h = 3{,}14 \cdot 5{,}5\ cm^2 \cdot 50\ cm = 4749{,}25\ cm^3.$$

Para calcular la porosidad, se vertió ese volumen en un tanque con dimensiones: 25 cm de largo por 20 cm de ancho y 20 cm de alto (capacidad máxima de 10000 cm^3) y con un volumen de agua conocido en su interior de 5000 cm^3 ($V_{agua\ tanque}$ = 5 litros) y se midió la cantidad de agua desplazada. De este modo:

$$V_{total} = V_{agua\ tanque} + V_{granos} + V_{aire} + V_{agua\ intersticial} \quad (9)$$

De los 5 litros iniciales, al menos uno de ellos es necesario reservarlo para arrastrar los restos de granos de arena que queden adheridos en las paredes interiores del tubo. De esta manera, el volumen de granos (V_{granos}) es el volumen total de la mezcla en el tanque menos el volumen de agua inicial del tanque (puesto que el aire que ocupaba los huecos intersticiales sale de la mezcla agua-sólido), y menos el volumen de agua intersticial presente en la muestra de arena natural. Este volumen de agua se determinó por diferencia de pesada según procedimiento descrito en las Normas UNE-103-300 (1993) y ASTM D2216 (2010): La muestra se pesa inicialmente húmeda y posteriormente se introduce en una estufa a una temperatura de secado de 105 ºC durante varios días, anotando cada día el peso del testigo hasta su estabilización. Una vez el peso es constante, se obtiene el porcentaje de agua presente en la muestra inicial por diferencia de pesada.

El volumen que resta hasta completar el volumen de arena muestreado con el tubo es el volumen de huecos o porosidad. Por tanto:

$$V_{granos} = V_{total} - V_{agua\ inicial} - V_{agua\ intersticial} \quad (10)$$

$$V_{poros} = V_{bruto\ arena} - V_{granos} \quad (11)$$

$$Índice_{granos}\ (a) = V_{granos} / V_{bruto\ arena} \quad (12)$$

$$Índice_{poros}\ (p) = (V_{poros} / V_{bruto\ arena}) = (1 - a) \quad (13)$$

El material necesario para el experimento (Figura 4.8) está compuesto por:

- Tubo PVC de 11 cm de diámetro y 50 cm de largo.
- Tapadera hermética de PVC para el tubo.
- Pala.
- Pala pequeña de mano.
- Cinta métrica y regla.
- Martillo de goma dura.
- Plancha lisa para segar la arena al final del tubo.
- Tanque con marcas de volumen
- Tijeras y navaja.
- Cámara de fotos.

Experimento en campo:

En la playa de La Fontanilla, se realizó una realimentación mediante vertido directo (con tuberías desde un buque draga) de arenas medias procedentes del dragado de la bocana y alrededores del Puerto de Conil en Cabo Roche.

Fig. 4.8. Imagen del estrato arenoso y utensilios de trabajo para el método de cores de PVC.

Procedimiento:

Primero se alisó la superficie del estrato de playa donde se iba a clavar el tubo (Figura 4.9). El tubo se introdujo horizontalmente en la arena, de forma suave y manual para no modificar la estructura interna del estrato arenoso (porosidad primaria) presente en los primeros 25 centímetros del suelo. Una vez introducido el tubo, se cavó a su alrededor y se procedió a medir la distancia total del tubo introducido en el estrato (volumen de arena captado). Se extrajo con delicadeza y se sellaron las bocas del tubo mediante tapas herméticas. Paralelamente también se extrajo una muestra de arena para la determinación de la humedad (contenido en agua) en el laboratorio mediante secado en estufa (UNE-103-300, 1993). El movimiento posterior a la extracción del tubo debido al transporte y manipulación no era importante puesto que el volumen bruto (arena + aire + agua) de arena tomado ya se había registrado. Sólo faltaba conocer el contenido en agua de la propia arena y posteriormente cuánta agua desplazaba todo ese volumen bruto para saber qué volumen de granos había realmente. Así, el volumen de granos y la humedad intersticial que desplaza el agua del tanque, nos da el volumen de aire presente en la arena, por diferencia con el volumen tomado inicialmente. De esta manera, se pudo conocer la porosidad del sedimento en esa capa de arena superficial. Cabe resaltar que el hecho de clavar el tubo en sentido vertical precisaría de la ayuda de golpes o maquinaria hidráulica debido a la presión de la masa de arena circundante.

Fig. 4.9. Vista de detalle del estrato de arena superficial.

Una vez en laboratorio se precisaba de un tanque con una capacidad de al menos 10 litros y que asegurara una medición precisa. Un tanque tipo pecera de 10 litros tiene una superficie demasiado elevada y no resultaba muy preciso para medir pequeñas diferencias de elevación del nivel de agua. Se necesitaba un matraz con una marca de enrase que permita medirlo, pero esta característica dificultaba en demasía el vertido de arena procedente del tubo de PVC, dentro del matraz. Además, debido al volumen que se estaba manejando, era poco práctica la utilización de un matraz aforado con capacidad superior a los 10 litros. Para una medición precisa, esta metodología de cores de PVC exige un material poco práctico y dificultoso en su manipulación para la toma de muestras y su posterior traslado y gestión en el laboratorio. Por ello, se ha tratado de innovar con otras técnicas que faciliten estos puntos.

4.4.1.2. Probetas.

Con el fin de facilitar la manipulación y gestión de las muestras tomadas y su posterior medida, se desarrolló una metodología consistente en la utilización en campo de probetas de plástico con una capacidad de enrase de hasta 1000 cm^3, marcadas cada 10 cm^3 (Figura 4.10). Las probetas se insertaron en la arena en sentido vertical y horizontal, con el fin de extraer muestras representativas de sedimento. Su introducción manual fue de manera progresiva (Figura 4.11), y también con golpeteos, por lo que se ha podido establecer el error diferencial cometido utilizando ambos métodos de introducción.

Fig. 4.10. Material utilizado en el método de las probetas.

Fig. 4.11. Penetración manual de la probeta en la arena de playa.

En el primer ensayo, la muestra se tomó en la parte alta de la playa de La Fontanilla, que contenía arena recientemente vertida mediante tubería y no había sido afectada por el oleaje ni la carrera de marea. Se recogieron muestras de arena con las probetas tanto en sentido horizontal a diferentes profundidades (0,1 y 0,4 m) como en sentido vertical (con y sin ayuda de golpeteos). Como en el caso de los cores de PVC, también se extrajo una muestra de arena para la determinación en el laboratorio del contenido en agua intersticial mediante secado en estufa (UNE-103-300, 1993).

Con el fin de poder comparar resultados, y calcular errores cometidos en la medición por reiteración, se procedió a repetir la toma de muestras de sedimento en el mismo punto. Siguiendo la misma metodología, también se tomaron muestras de arena nativa con las probetas en la playa de El Palmar (T.M. Vejer de la Frontera) y en la playa de Valdelagrana (T.M. Puerto de Santa María).

El procedimiento de actuación en el caso de la metodología de las probetas fue el siguiente:

- Para una mejor penetración en el sedimento, se afilaron los bordes de las probetas.
- Se clavó la probeta hasta el máximo que se pudo manualmente y de manera continua.
- Se anotó el volumen exacto de arena en el que se ha llegado a clavar (volumen de arena bruto). Se midió según el rasero marcado por la superficie del suelo, no por el volumen acrecido en el interior de la probeta.
- Aprovechando el vacío generado dentro de la probeta por el propio material húmedo, tras su extracción, se giró la probeta 180º y se selló para su transporte.
- Se recogió una muestra de arena para la determinación del contenido en agua intersticial.
- Una vez en el laboratorio, se añadió un volumen conocido de agua, vertiéndola por las paredes internas con la finalidad de que arrastre la arena adherida en ellas.
- Se agitó la mezcla con una varilla o en una tamizadora electromagnética durante 10 minutos (Figura 4.12) con el fin de que saliera todo el aire y los huecos se colmaten de agua. De esta manera quedaron dos fases: una fase con una mezcla de arena y agua y otra fase con agua excedente.
- Finalmente se anotó el volumen de ambas fases.

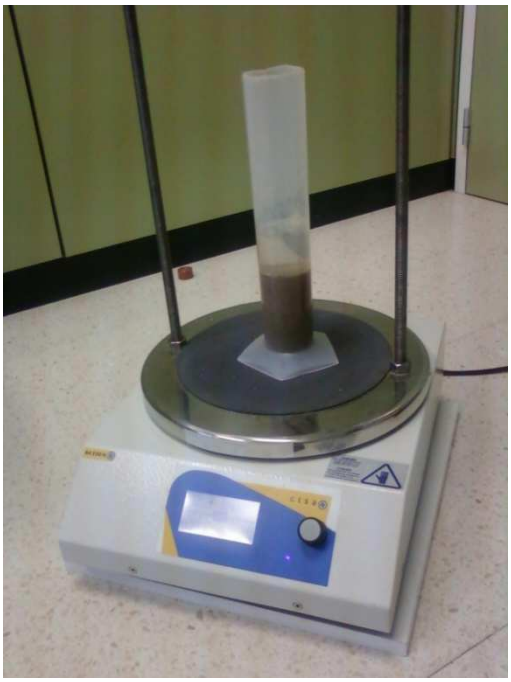


Fig. 4.12. Vista de la agitación de la mezcla de arena y agua en la tamizadora.

En este caso, para el cálculo del volumen de granos y el volumen de poros, los parámetros a considerar son:

- Volumen de arena bruta (arena+agua+aire) recogida con la probeta en la playa: $V_{inicial}$
- Volumen de agua intersticial presente de manera natural en la muestra: $V_{agua\ intersticial}$
- Volumen de mezcla de arena bruta y agua: V_{mezcla}
- Volumen de agua admitida: es el volumen total de agua vertida en la probeta que ocupa los huecos de aire menos el volumen de agua excedente: $V_{agua\ admitida}$
- Volumen de granos: V_{granos}
- Volumen de poros: V_{poros}

Por tanto:

$$V_{granos} = V_{inicial} - V_{agua\ intersticial} - V_{agua\ admitida} \quad (14)$$

$$V_{poros} = V_{inicial} - V_{granos} \quad (15)$$

Por tanto, conocido el volumen de granos y de poros de la muestra de arena, se puede calcular el índice de granos (a) y el índice de poros o porosidad (p) utilizando las ecuaciones (12) y (13).

4.4.1.3. Testigos de acero inoxidable.

Además de las metodologías volumétricas, también se experimentó con metodologías de pesada. En este caso, se utilizaron unos testigos cilíndricos de acero inoxidable abiertos por ambas caras y con sus tapaderas correspondientes. El testigo tiene unas dimensiones interiores conocidas, donde se introdujo el volumen de sedimento muestreado (20 cm de largo y 10 cm de diámetro). El volumen interior total de los cilindros es el siguiente:

$$V_{testigo} = \Pi \cdot r^2 \cdot h = 3{,}14 \cdot (5\ cm)^2 \cdot 20\ cm = 1570\ cm^3$$

En este caso, se acudió al perfil 2 de la playa Victoria para realizar el experimento. Se tomaron muestras de arena en 3 puntos del perfil afectado por la carrera de marea: P2 M, P2 Mbis y P2 B. Cada punto de medida se hizo por triplicado, recogiendo 3 testigos de arena por punto (9 en total).

El procedimiento para la determinación de la porosidad ha sido:

- Rotulado de los testigos y tapaderas: localización y fecha de muestreo.
- Pesado de los testigos vacíos y las tapaderas en seco.
- Una vez en la playa, se ha realizó un corte en el estrato de arena y se tomaron las muestras de arena por triplicado, introduciendo horizontal y completamente el testigo a 0,2 m de profundidad (Figura 4.13). Se han enrasado ambas bocas, se han colocado las tapaderas y se han trasladado al laboratorio en bolsas herméticas para su análisis (Figura 4.14).

Fig. 4.13. Vista de la introducción horizontal de los testigos a 0,2 m de profundidad.

Fig. 4.14. Vista de la extracción, enrasado, tapado y envasado en bolsas herméticas de los testigos llenos de arena.

- En laboratorio, se pesaron los testigos con la arena húmeda y tapaderas incluidas.
- Secado en horno mufla del testigo relleno de arena para la determinación directa de la humedad del suelo a 105ºC siguiendo las Norma UNE-103-300 (1993) y norma correspondiente ASTM D2216 (2010).
- Pesado de los testigos con arena totalmente seca. Este pesado proporciona la masa seca de la mezcla de los granos de arena y aire, en un volumen conocido: La densidad de la masa de arena es la relación entre el peso de la arena seca y el volumen original ocupado. La densidad del aire se considera despreciable.

$$\text{Densidad}_{\text{aparente}} = \text{Masa}_{\text{arena seca}} / \text{V}_{\text{testigo}} \quad (16)$$

- Aplicando la densidad real media (2650 Kg/m^3) de arenas litorales compuestas mayoritariamente por cuarzo (Ciavola et al., 1998; USACE, 2002 y Payo et al., 2008), se ha podido conocer el volumen de granos presente en el testigo.

$$\text{V}_{\text{granos}} = \text{Masa}_{\text{arena seca}} / \text{Densidad}_{\text{real}} \quad (17)$$

- Asumiendo que el índice de granos (a) es igual a la unidad cuando todo el volumen del testigo estuviera lleno en su totalidad, dicho índice podría expresarse como una relación entre la densidad aparente de la masa de arena presente en el testigo y la densidad real del mismo.

$$a = \text{Densidad}_{\text{aparente}} / \text{Densidad}_{\text{real}} \quad (18)$$

De igual forma que la fórmula (12), el índice de granos (a) sería la relación entre el Volumen ocupado por los granos y el Volumen total del testigo:

$$a = V_{\text{granos}} / V_{\text{testigo}} \quad (19)$$

- Utilizando la fórmula (13), el índice de huecos o de poros (p) es el índice de granos restado a la unidad (1-a).

4.4.1.4. Picnómetro de Helio.

La determinación de la densidad relativa de las partículas sólidas en un picnómetro se basa en el desplazamiento de volúmenes. Lo que realmente realizan estos aparatos es una medición muy precisa del volumen real de un sólido, basada en el principio de Arquímedes o empuje hidrostático. El picnómetro es un recipiente de volumen estable que se llena con un fluido de densidad conocida. Cuando posteriormente se introduce la muestra cuya densidad o peso específico se quiere conocer, ésta desplaza un cierto volumen de fluido. El volumen de fluido desplazado, generalmente determinado por la diferencia de peso del conjunto, equivale al volumen de la muestra objeto de estudio. Conocida la masa o el peso de la muestra con gran exactitud, es posible calcular su densidad o su peso específico respectivamente, independientemente de que la morfología de la muestra sea más o menos regular o irregular o se encuentre en bloque o en polvo. Las propiedades de los materiales geológicos que determinan su comportamiento en el picnómetro, tanto de agua como de gas, son su red porosa, superficie específica y tamaño de partícula, así como los fenómenos de interacción que se producen entre la superficie de las mismas y el fluido del picnómetro. Por ello, la diferencia fundamental entre el picnómetro de agua y el picnómetro de gas radica en las propiedades físico-químicas de los dos fluidos utilizados: tamaño molecular, energía de hidratación y capacidad de adsorción, fundamentalmente debidas a fuerzas de tipo dipolo o van der Waals. De entre todas estas propiedades, la característica específica del picnómetro de gas es que funciona con gases ideales potencialmente no reactivos con la superficie de las partículas sólidas (CEDEX, 2008).

El *picnómetro de agua* es un recipiente de vidrio provisto de un tapón con un tubo capilar marcado con un enrase en su parte superior que permite determinar la densidad de un material desconocido, en referencia a un fluido de densidad conocida como el agua o el mercurio, según las indicaciones de la norma UNE 103-302 (1994).

El funcionamiento del *picnómetro de gas* se basa en la Ley de Boyle-Mariotte (el volumen es inversamente proporcional a la presión, siempre y cuando la temperatura y la masa del gas permanezcan constantes) aplicada al comportamiento de gases ideales. Para poder aplicar este principio es necesario usar un gas cuyo comportamiento pueda describirse como el de un gas ideal, es decir, que cumpla la Ley de los Gases Ideales (gases con moléculas totalmente libres, sin interacción entre ellas). Todos los picnómetros de gas, al igual que el picnómetro de agua, se basan en el desplazamiento de volúmenes, es decir, lo que realmente realizan estos aparatos es una medición muy precisa del volumen real de un sólido. Si, además de medir el volumen con la mayor precisión posible se conoce su masa también con bastante exactitud, es posible calcular su densidad real en g/cm^3. La característica adicional del picnómetro de gas es que funciona con gases ideales potencialmente no reactivos con la superficie de las partículas sólidas (ASTM D5550, 2006), por lo que es independiente de que la morfología de la muestra sea más o menos regular o irregular o se encuentre en estado sólido o polvo (CEDEX, 2008).

En esta investigación se ha utilizado el picnómetro de gas Helio. Es una máquina ampliamente utilizada en medidas de densidad y porosidad de sedimentos y rocas (Mosquera et al., 2010 y Pinho et al., 2013). Este método permite traer una muestra inalterada directamente de la playa en un cilindro de acero inoxidable (Figura 4.15) de diferentes medidas según las necesidades, y medir la densidad real del sólido. En este experimento, se han utilizado las dos cubetas de diferente tamaño (grande y pequeña) que proporciona el fabricante para la medida de densidad. Se han clavado horizontalmente los cilindros en un corte del estrato de arena de la playa del Río San Pedro (T.M. de Puerto Real), se han enrasado despreciando la arena excedente y se han sellado.

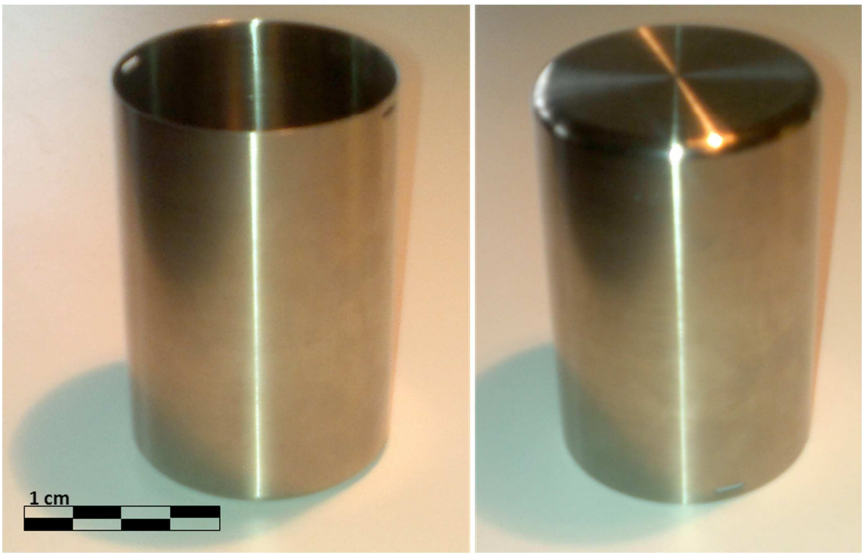


Fig. 4.15. Detalle del anverso y reverso de la cubeta utilizada en el picnómetro de Helio.

Posteriormente se ha trasladado al laboratorio del Grupo de Investigación: Tamices Moleculares y otros Nanomateriales (TEP-243) de la Universidad de Cádiz, donde se ha pesado en húmedo, se ha secado en estufa a 105ºC (UNE 103-300, 1993 y ASTM D2216, 2010) para posteriormente pesarlo en seco. Una vez conocido el peso neto inicial de la arena, se introduce la cubeta llena de arena en el picnómetro. Se programa el aparato (Figura 4.16) y automáticamente inyecta el gas (Helio) rellenando todos los huecos a una determinada presión. Una vez que el Helio inyectado ha rellenado todos los huecos, el picnómetro realiza diversas mediciones de densidad. Normalmente se programan 15 mediciones para calcular un valor medio aceptable con la menor desviación típica posible.

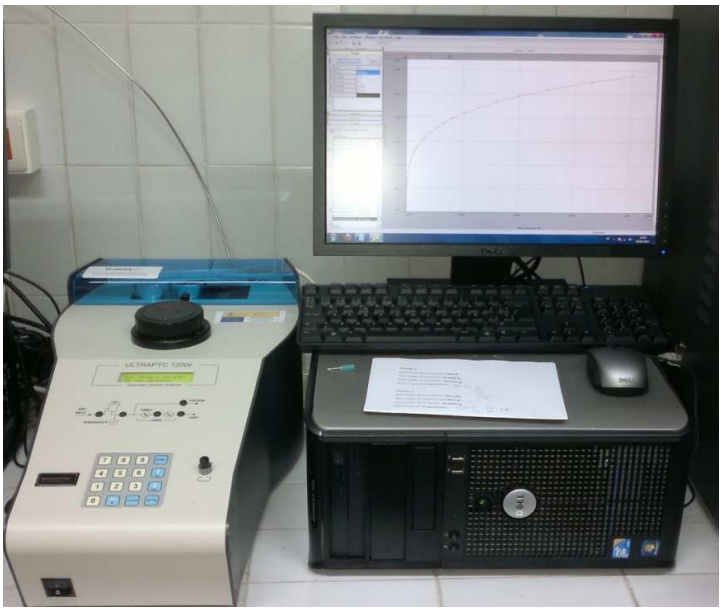


Fig. 4.16. Picnómetro de Helio.

La metodología del picnómetro proporciona la densidad real del sedimento, es decir, la densidad media de los granos sólidos que componen la arena, no la densidad aparente de la masa de arena (granos + aire + agua).

Otras metodologías similares utilizadas en la medición de la densidad de rocas son:

- Porosímetro de mercurio (Hg): Miden la porosidad de materiales hasta huecos <300 micras (Mosquera et al., 2002)
- Porosímetro de fisisorción de nitrógeno (N): mide porosidad de materiales con huecos entre 1 micra y 10 Amstrong.
- Determinación de la porosidad sensible al agua (Open porosity): mide la porosidad de ciertos materiales sensibles de ser rellenados con agua.
- Método de determinación de la permeabilidad al vapor de agua: mide la porosidad de materiales hidrófobos, susceptibles de ser rellenados por el vapor de agua (Mosquera et al., 2010).

4.4.2. Métodos nucleares

La utilización de instrumentos nucleares para la determinación de densidades y humedades, ha sido aprobada por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM D6938, 2010). Los métodos nucleares para la determinación de la densidad aparente y el contenido de agua son útiles, rápidos y no destructivos. Normalmente esta metodología nuclear es utilizada en el control y calidad del nivel de compactación de agregados mixtos de áridos usados en construcción y en investigación y desarrollo. Su naturaleza no destructiva permite ensayos repetitivos en la misma localización, permitiendo así el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos.

El **densímetro nuclear** es un aparato capaz de medir al instante y con precisión, la humedad y la densidad relativa de suelos, bases, áridos y otros compuestos, sin tener que recurrir a métodos de intervención física, como pudiera ocurrir con la extracción de muestra o alteración del suelo a medir. La determinación de la densidad (seca o húmeda) y el contenido en agua (humedad) a través de este método, está basada en la interacción de los rayos gamma, emitidos por una fuente radiactiva de Cesio-137, y los electrones de las órbitas exteriores de los átomos del suelo, la cual es captada por un detector gamma situado a corta distancia de la fuente emisora, sobre, dentro o adyacente al material a medir, y un microprocesador convierte los conteos en una medida de densidad. Como el número de electrones presente por unidad de volumen de suelo es proporcional a la densidad de éste,

es posible correlacionar el número relativo de rayos gamma dispersos con el número de rayos detectados por unidad de tiempo, el cual es inversamente proporcional a la densidad húmeda del material. La lectura de la intensidad de la radiación, es convertida a medida de densidad húmeda por medio de una curva de calibración apropiada del equipo (ASTM D6938, 2010).

Por lo general, existen dos formas para hacer las determinaciones a través de la emisión de rayos gama: la *transmisión directa* (utilizada en esta investigación) y la *retrodispersión*, proporcionando ambos métodos resultados satisfactorios en espesores aproximados entre 0,05 a 0,3 m. Estos métodos son útiles como técnicas rápidas no destructivas siempre y cuando el material a medir sea homogéneo. En el caso que nos ocupa, el equipo a utilizar ha sido un densímetro nuclear marca "Troxler", modelo Roadreader 3430.

En el modo de *transmisión directa* (Figura 4.17), se introduce la varilla con la fuente de Cesio-137 en el terreno hasta la profundidad deseada. Los detectores en la base de la sonda cuantifican la radiación emitida por la varilla con la fuente. Para llegar a los detectores, los fotones gamma deben primero pasar a través del material, donde chocan con los electrones ahí presentes. Una alta densidad del material supone un alto número de choques correspondientes, lo que reduce el número de fotones que llegan a los detectores, es decir, mientras menor sea de número de fotones que alcancen a los detectores, mayor será la densidad del material. Este modo de operación minimiza la incertidumbre ocasionada por las superficies rugosas y la composición química del material evaluado, determinando una elevada exactitud en las mediciones. Según el fabricante (Troxler et al., 2001), la transmisión directa es utilizada para la evaluación en capas con espesor de medio a grueso, de suelos, agregados, capas asfálticas y losas de concreto hidráulico.

En el modo de *retrodispersión* (Figura 4.18), los fotones gamma deben ser dispersados (o reflejados) por lo menos una vez, antes de alcanzar a los detectores en la sonda. Para efectuar este proceso, se coloca la varilla de manera que, la fuente y los detectores se encuentran en el mismo plano, denominado posición de retrodispersión. Los fotones provenientes de la fuente penetran en el material, y los que se dispersan son medidos por los detectores. A fin de evitar que los fotones puedan acceder a los detectores directamente, sin ser dispersados por el material, la sonda dispone de blindajes entre la fuente y los detectores.

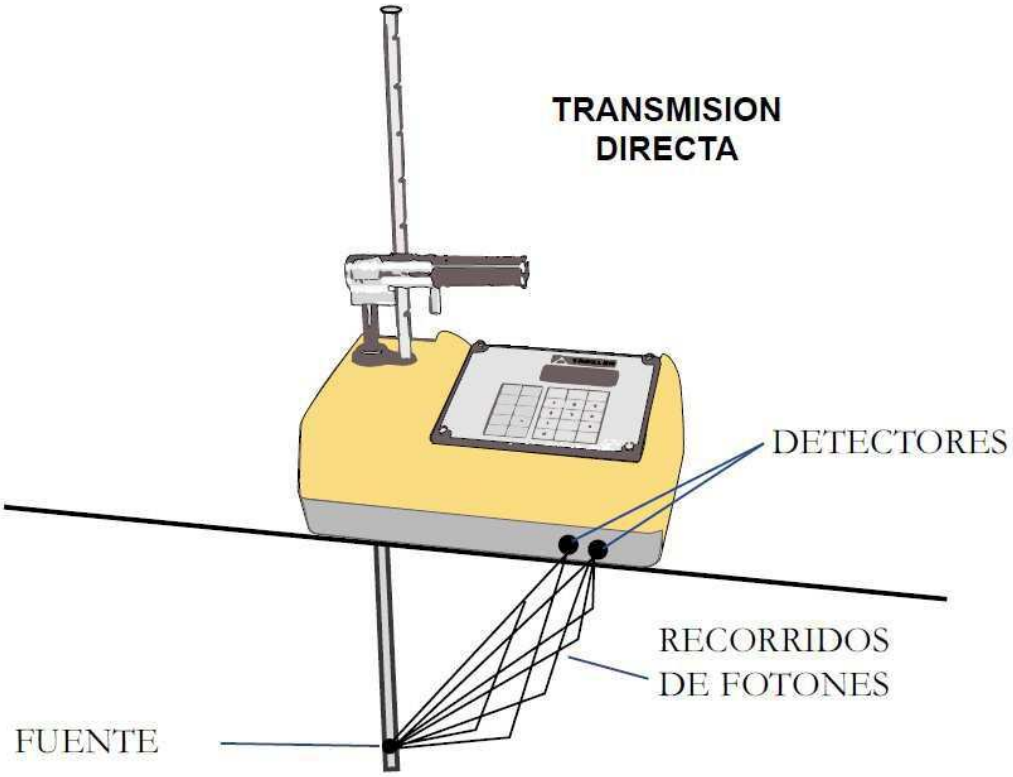


Fig. 4.17. Croquis de un densímetro nuclear en el modo de transmisión directa. (Fuente: www.troxlerlabs.com).

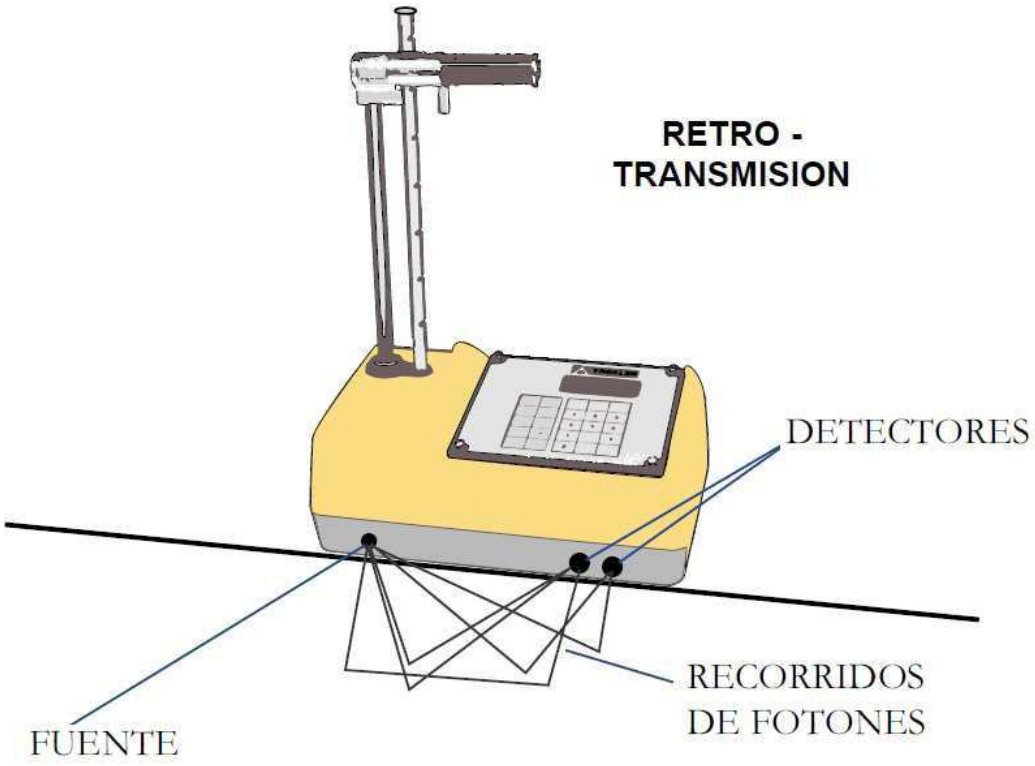


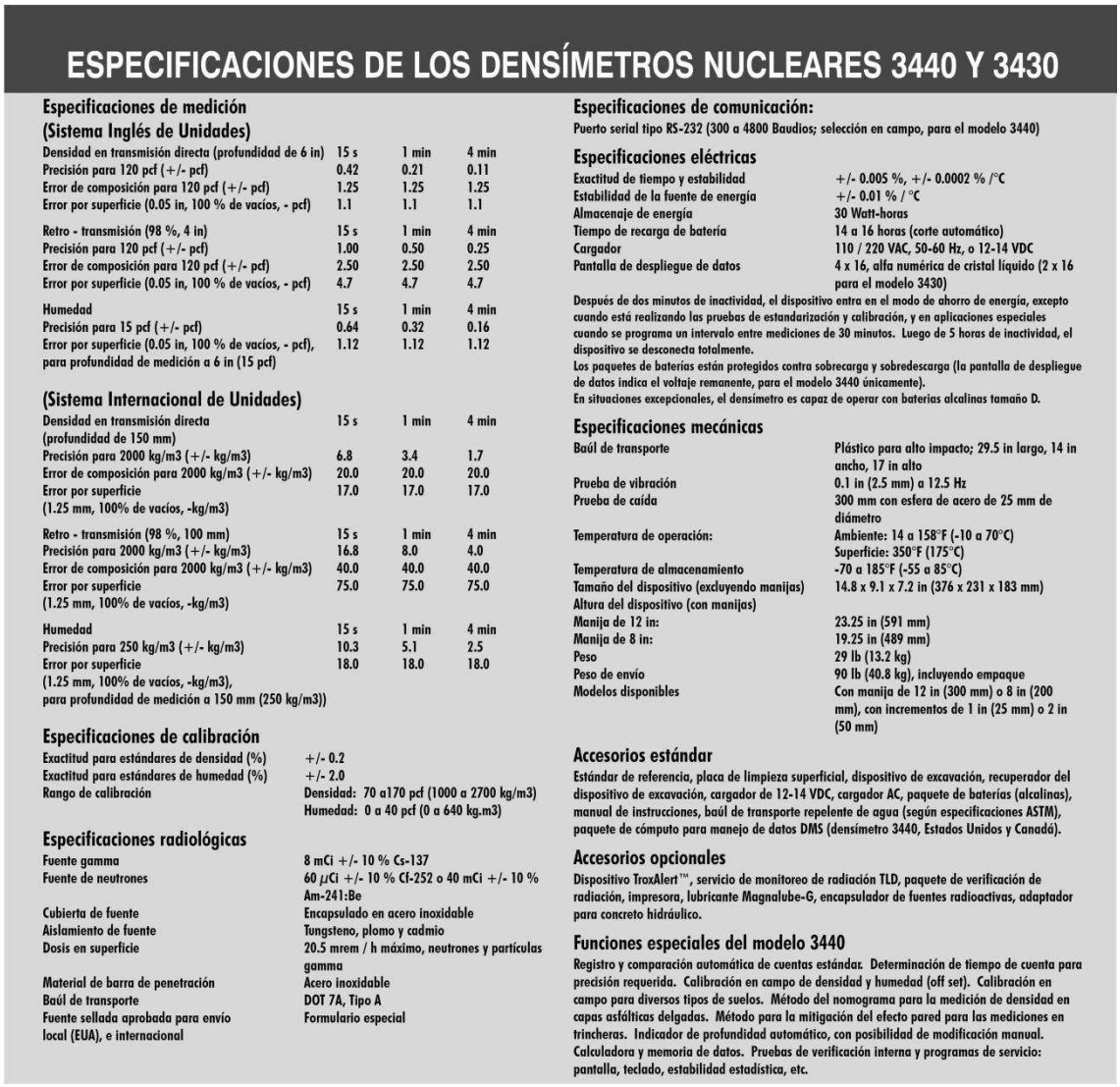
Fig. 4.18. Croquis de un densímetro nuclear en el modo de retrotransmisión. (Fuente: www.troxlerlabs.com).

Asimismo, la medición de humedad es un ensayo no destructivo. La fuente de neutrones y el detector permanecen dentro del densímetro, sobre la superficie del material a analizar. Para determinar la humedad de los suelos y materiales semejantes, se utiliza el principio de termalización de neutrones: Emisiones de neutrones, a alta velocidad, son introducidas en la capa evaluada, y son detenidas parcialmente por sus colisiones contra los átomos de hidrógeno dentro del material. Es decir, el hidrogeno (en forma de agua) en el material frena los neutrones emitidos por una fuente constituida de Americio-241-Berilio. La detección de los neutrones frenados se realiza mediante detectores de Helio-3. El detector de helio, situados en la base del densímetro, cuenta la cantidad de neutrones termalizados (con velocidad disminuida) que correlaciona directamente con la cantidad de humedad en el material evaluado.

El densímetro nuclear no funciona en contacto directo con el agua, por lo que los ensayos en bajamar (B) fueron realizados en la zona más cercana posible.

Algunas características técnicas se describen a continuación. No obstante, en la Figura 4.19 se pueden consultar una completa guía de las especificaciones técnicas del densímetro nuclear utilizado:

- Densímetro nuclear, modelo Troxler Roadreader 3430.
- Peso: 13,2 kg.
- Informe directo en pantalla, de densidad húmeda, densidad seca, humedad, porcentaje de humedad, porcentaje de vacíos y porcentaje de compactación.
- Baterías recargables NICAD o alcalinas de relevo.
- Guías de operación en pantalla.



ESPECIFICACIONES DE LOS DENSÍMETROS NUCLEARES 3440 Y 3430

Especificaciones de medición

(Sistema Inglés de Unidades)

Densidad en transmisión directa (profundidad de 6 in)	15 s	1 min	4 min
Precisión para 120 pcf (+/- pcf)	0.42	0.21	0.11
Error de composición para 120 pcf (+/- pcf)	1.25	1.25	1.25
Error por superficie (0.05 in, 100 % de vacíos, - pcf)	1.1	1.1	1.1
Retro - transmisión (98 %, 4 in)	15 s	1 min	4 min
Precisión para 120 pcf (+/- pcf)	1.00	0.50	0.25
Error de composición para 120 pcf (+/- pcf)	2.50	2.50	2.50
Error por superficie (0.05 in, 100 % de vacíos, - pcf)	4.7	4.7	4.7
Humedad	15 s	1 min	4 min
Precisión para 15 pcf (+/- pcf)	0.64	0.32	0.16
Error por superficie (0.05 in, 100 % de vacíos, - pcf), para profundidad de medición a 6 in (15 pcf)	1.12	1.12	1.12

(Sistema Internacional de Unidades)

Densidad en transmisión directa (profundidad de 150 mm)	15 s	1 min	4 min
Precisión para 2000 kg/m3 (+/- kg/m3)	6.8	3.4	1.7
Error de composición para 2000 kg/m3 (+/- kg/m3)	20.0	20.0	20.0
Error por superficie (1.25 mm, 100% de vacíos, -kg/m3)	17.0	17.0	17.0
Retro - transmisión (98 %, 100 mm)	15 s	1 min	4 min
Precisión para 2000 kg/m3 (+/- kg/m3)	16.8	8.0	4.0
Error de composición para 2000 kg/m3 (+/- kg/m3)	40.0	40.0	40.0
Error por superficie (1.25 mm, 100% de vacíos, -kg/m3)	75.0	75.0	75.0
Humedad	15 s	1 min	4 min
Precisión para 250 kg/m3 (+/- kg/m3)	10.3	5.1	2.5
Error por superficie (1.25 mm, 100% de vacíos, -kg/m3), para profundidad de medición a 150 mm (250 kg/m3))	18.0	18.0	18.0

Especificaciones de calibración

Exactitud para estándares de densidad (%)	+/- 0.2
Exactitud para estándares de humedad (%)	+/- 2.0
Rango de calibración	Densidad: 70 a170 pcf (1000 a 2700 kg/m3) Humedad: 0 a 40 pcf (0 a 640 kg.m3)

Especificaciones radiológicas

Fuente gamma	8 mCi +/- 10 % Cs-137
Fuente de neutrones	60 µCi +/- 10 % Cf-252 o 40 mCi +/- 10 % Am-241:Be
Cubierta de fuente	Encapsulado en acero inoxidable
Aislamiento de fuente	Tungsteno, plomo y cadmio
Dosis en superficie	20.5 mrem / h máximo, neutrones y partículas gamma
Material de barra de penetración	Acero inoxidable
Baúl de transporte	DOT 7A, Tipo A
Fuente sellada aprobada para envío local (EUA), e internacional	Formulario especial

Especificaciones de comunicación:

Puerto serial tipo RS-232 (300 a 4800 Baudios; selección en campo, para el modelo 3440)

Especificaciones eléctricas

Exactitud de tiempo y estabilidad	+/- 0.005 %, +/- 0.0002 % /°C
Estabilidad de la fuente de energía	+/- 0.01 % / °C
Almacenaje de energía	30 Watt-horas
Tiempo de recarga de batería	14 a 16 horas (corte automático)
Cargador	110 / 220 VAC, 50-60 Hz, o 12-14 VDC
Pantalla de despliegue de datos	4 x 16, alfa numérica de cristal líquido (2 x 16 para el modelo 3430)

Después de dos minutos de inactividad, el dispositivo entra en el modo de ahorro de energía, excepto cuando está realizando las pruebas de estandarización y calibración, y en aplicaciones especiales cuando se programa un intervalo entre mediciones de 30 minutos. Luego de 5 horas de inactividad, el dispositivo se desconecta totalmente.
Los paquetes de baterías están protegidos contra sobrecarga y sobredescarga (la pantalla de despliegue de datos indica el voltaje remanente, para el modelo 3440 únicamente).
En situaciones excepcionales, el densímetro es capaz de operar con baterías alcalinas tamaño D.

Especificaciones mecánicas

Baúl de transporte	Plástico para alto impacto; 29.5 in largo, 14 in ancho, 17 in alto
Prueba de vibración	0.1 in (2.5 mm) a 12.5 Hz
Prueba de caída	300 mm con esfera de acero de 25 mm de diámetro
Temperatura de operación:	Ambiente: 14 a 158°F (-10 a 70°C) Superficie: 350°F (175°C)
Temperatura de almacenamiento	-70 a 185°F (-55 a 85°C)
Tamaño del dispositivo (excluyendo manijas)	14.8 x 9.1 x 7.2 in (376 x 231 x 183 mm)
Altura del dispositivo (con manijas)	
Manija de 12 in:	23.25 in (591 mm)
Manija de 8 in:	19.25 in (489 mm)
Peso	29 lb (13.2 kg)
Peso de envío	90 lb (40.8 kg), incluyendo empaque
Modelos disponibles	Con manija de 12 in (300 mm) o 8 in (200 mm), con incrementos de 1 in (25 mm) o 2 in (50 mm)

Accesorios estándar

Estándar de referencia, placa de limpieza superficial, dispositivo de excavación, recuperador del dispositivo de excavación, cargador de 12-14 VDC, cargador AC, paquete de baterías (alcalinas), manual de instrucciones, baúl de transporte repelente de agua (según especificaciones ASTM), paquete de cómputo para manejo de datos DMS (densímetro 3440, Estados Unidos y Canadá).

Accesorios opcionales

Dispositivo TroxAlert™, servicio de monitoreo de radiación TLD, paquete de verificación de radiación, impresora, lubricante Magnalube-G, encapsulador de fuentes radioactivas, adaptador para concreto hidráulico.

Funciones especiales del modelo 3440

Registro y comparación automática de cuentas estándar. Determinación de tiempo de cuenta para precisión requerida. Calibración en campo de densidad y humedad (off set). Calibración en campo para diversos tipos de suelos. Método del nomograma para la medición de densidad en capas asfálticas delgadas. Método para la mitigación del efecto pared para las mediciones en trincheras. Indicador de profundidad automático, con posibilidad de modificación manual. Calculadora y memoria de datos. Pruebas de verificación interna y programas de servicio: pantalla, teclado, estabilidad estadística, etc.

Fig. 4.19. Especificaciones técnicas del densímetro nuclear utilizado. (Fuente: www.troxlerlabs.com).

4.4.3. Otros métodos

Existen diferentes métodos para la determinación de la densidad de la arena, regulados mediante Normas UNE y/o normas ASTM. Una norma es un documento de aplicación voluntaria que contiene especificaciones técnicas basadas en los resultados de la experiencia y del desarrollo tecnológico (AENOR, 2013). Las normas son el fruto del consenso entre todas las partes interesadas e involucradas en la actividad objeto de la misma. Además, deben aprobarse por un Organismo de Normalización reconocido. Las normas técnicas en España se elaboran en el seno de AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), la entidad legalmente responsable de su desarrollo a través

de los Comités Técnicos de Normalización acreditados por la ENAC (Entidad Nacional de Acreditación).

Para el caso de la determinación de la densidad de un suelo, las normas UNE y ASTM son principalmente las siguientes:

- UNE 103-105:1993: Determinación de la densidad mínima de una arena.
- UNE 103-106:1993: Determinación de la densidad máxima de una arena por el método de apisonado.
- UNE 103-301:1994: Determinación de la densidad de un suelo. Método de la balanza hidrostática.
- UNE 103-302:1994: Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.
- UNE 103-503:1995: Determinación "in situ" de la densidad de un suelo por el método de la arena.
- ASTM D6938 – 10 Standard Test Method for In-Place Density and Water. Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth).
- ASTM D7263 - 09 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens.
- ASTM D2937 - 10 Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Drive- Cylinder Method.
- ASTM D4564 - 08 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sleeve Method.
- ASTM D1556 - 07 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method.

Asimismo, existen otras técnicas de medida de otros parámetros que se pueden relacionar directamente con medidas indirectas de porosidad del sedimento. Por ejemplo, en el campo del conocimiento de la agricultura y la edafología, la ingeniería agrónoma ha desarrollado un sencillo sistema de cálculo de la conductividad hidráulica (permeabilidad) de un suelo saturado mediante un infiltrómetro de doble anillo o anillos de Munz (Figura 4.20) (Bouwer, 1961; Bouwer, 1962 y Porta et al., 2003). En este caso, la permeabilidad se puede relacionar directamente con la porosidad de la arena (Fraser, 1935; Pryor, 1973; McLachlan and Turner, 1994; Reis y Gama, 2010 y Valladares et al., 2012) y por tanto es posible analizar la relación entre la recuperación natural de una playa y el grado de permeabilidad de sus sedimentos.

Fig. 4.20. Detalle del infiltrómetro de doble anillo o anillos de Munz.

4.5. Determinación de la compactación máxima del sedimento: Ensayo Proctor modificado.

Con el fin de conocer la densidad máxima que puede alcanzar una arena sometida a una misma energía de compactación y a una determinada humedad (humedad óptima), se realiza en el laboratorio el ensayo Proctor modificado. Este método está basado en la determinación de las densidades secas de varias probetas, compactadas en idénticas condiciones pero con contenidos de humedad diferentes. El método de ensayo Proctor modificado se rige por la norma estadounidense ASTM D1557 (2012) y por la norma española UNE 103-501 (1994). Esta última norma tiene por objeto especificar el método para determinar, en un suelo, la relación entre la densidad seca y la humedad, para una energía de compactación de 2632 J/cm^3, y definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente, denominada óptima, que se puede conseguir en ese suelo en el laboratorio. Se define "humedad óptima" del suelo aquella con la que se consigue la máxima densidad seca, para la energía de compactación definida anteriormente.

Para cada contenido de humedad se alcanza una determinada densidad, de manera que estos pares de valores, representados en coordenadas cartesianas, definen la relación buscada. En un gráfico que tenga por abscisas los tantos por ciento de humedad y por ordenadas las densidades secas, se sitúan los puntos definidos por los valores calculados. Con estos puntos se dibuja una curva suave. Las coordenadas del máximo de esta curva definen la "densidad máxima" para una determinada "humedad óptima" del ensayo (Figura 4.21).

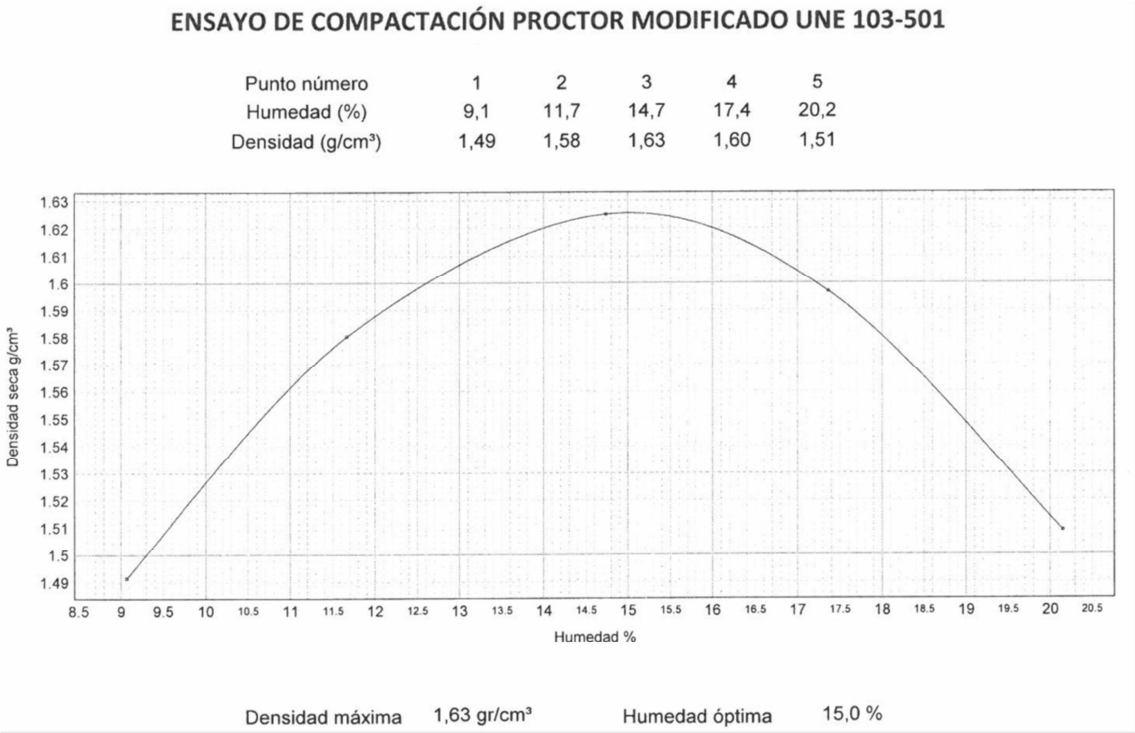


Fig. 4.21. Ejemplo gráfico de la curva descrita en el ensayo Proctor modificado para la determinación de la densidad máxima para una humedad óptima.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de las densidades de las diferentes arenas, se realizaron ensayos Proctor modificado en las playas Victoria, Camposoto, La Atunara, La Ballena y La Fontanilla, tomándose muestras de la arena nativa de cada una y comparándolas con los ensayos Proctor realizados a las arenas de préstamo para cada caso concreto. Utilizando este test, es posible determinar y comparar la compresión de las diferentes arenas bajo las mismas condiciones energéticas de compactación.

4.6. Calibración y determinación de la metodología.

En este apartado se especificará la metodología seguida para la calibración del densímetro nuclear. Asimismo, se determinarán los ensayos realizados de precisión, con el aparato calibrado, teniendo en cuenta la heterogeneidad del terreno en una playa y la propia fiabilidad del aparato.

4.6.1. Calibración del densímetro nuclear

La calibración del densímetro nuclear es un aspecto muy importante en cuanto a que reduce el error cometido por la propia desviación de aparato. La norma que rige la calibración de este tipo de sensores viene recogida en la ASTM D7013/D7013M (2011). La calibración del equipo se realiza mediante unas curvas de calibrado. Según lo especificado en la página del fabricante del densímetro (Troxler et al., 2001), el método usado para establecer la curva, es el mismo que se usa para determinar la densidad medida en campo. En este caso, para establecer la curva se utilizan materiales puros, cuyas densidades deben ser conocidas, uniformes y variar dentro de un rango conocido que incluya la del suelo a medir. No obstante, las curvas de calibración deberán comprobarse si el equipo está recién adquirido o si los resultados de los ensayos de rutina se estiman que sean inexactos. Asimismo, se puede utilizar el método del cono de arena (UNE 103.503, 1995 y ASTM D1556, 2007) para chequear la curva de calibración. Además, de una manera muy sencilla, es posible introducir calibraciones especiales, para trabajos con materiales cuyas densidades no estén cubiertas por la calibración efectuada en origen (1000 a 2700 kg/m^3 en densidad y 0 a 640 kg/m^3 en humedad).

4.6.2. Estudios de precisión

Según el fabricante (Troxler et al., 2001), la precisión técnica del densímetro (para 2000 kg/m^3 y 15 cm de profundidad) es de ±3,4 kg/m^3 para la densidad, siendo para la humedad (a 250 kg/m^3) de ±5,1 kg/m^3, en lecturas de un minuto (ASTM D6938, 2010).

Con el fin de determinar la precisión real de las mediciones ejecutadas, se han realizado una serie de ensayos con el densímetro nuclear evaluando la variabilidad introducida por la heterogeneidad del terreno y la debida al propio sensor del aparato. Todos los ensayos de precisión se han practicado en la misma playa (Victoria, Cádiz), concretamente en el Perfil 2.

4.6.2.1. Heterogeneidad del terreno.

El suelo de una playa no es una superficie estable y uniforme, sino que está compuesto por arena suelta con diferentes grados de humedad y compactación. Es por ello que en función del posicionamiento del aparato, se pueden obtener diferentes valores debidos al estado del terreno y/o su composición. Para estimar la variabilidad en las mediciones del densímetro nuclear debido a la heterogeneidad del terreno, se han realizado una serie de ensayos en la playa Victoria:

- ✓ Medida de 5 puntos uniformemente distribuidos en un espacio de 1 m^2: En un cuadrilátero de 1x1 m se distribuyen 5 puntos: uno en cada esquina y otro en el centro (Figura 4.22).

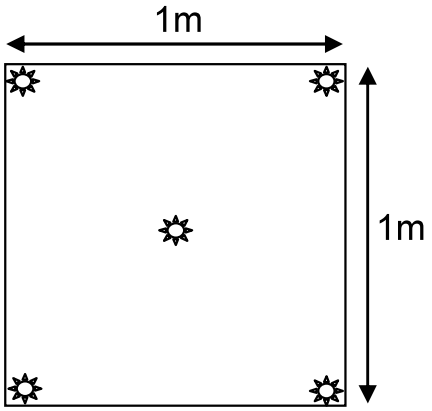


Fig. 4.22. Esquema en planta de la distribución de medidas con el densímetro nuclear en un cuadrado de 1 m^2 para la estimación de la variabilidad espacial en función de la heterogeneidad del terreno.

Los ensayos se realizaron en dos zonas diferenciadas del perfil transversal en la playa Victoria: en la parte seca de la playa y en el intermareal (Figura 4.23), ya que ambas zonas cuentan con diferente porcentaje de humedad. De este modo, también podrá comprobarse en qué medida puede influir la humedad en estos ensayos.

Fig. 4.23. Medidas realizadas con el densímetro en la parcela de 1 m² en la zona de playa emergida (izd.) y en la zona media del intermareal (der.).

- ✓ Medida de 3 puntos en el estrato vertical: Se realiza un corte vertical de 0,6 m (Figura 4.24) en el estrato de la arena en la zona intermareal (para evitar que se desmorone) y se mide verticalmente con el densímetro nuclear. Se realiza una medición en el techo del estrato (a 0,3 m de la cornisa) y otras dos mediciones en la columna a una profundidad de 0,25 y 0,50 m (Figura 4.25). La finalidad del ensayo es estudiar la variabilidad de la porosidad en toda la columna sedimentaria hasta una potencia de 0,5 m (Figura 4.26).

Fig. 4.24. Vista del corte vertical en el estrato, superior a los 0,6 m.

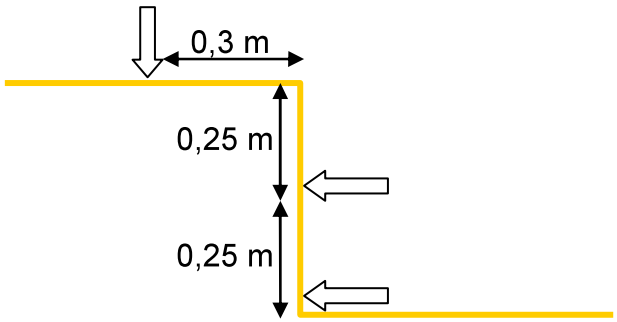


Fig. 4.25. Croquis en perfil de la distribución de medidas en vertical y horizontal en el estrato.

Fig. 4.26. Vista de la medida realizada a 0,3 m de la cornisa del estrato (arriba) y de las medidas realizadas a 0,25 m (abajo izd.) y a 0,50 m (abajo der.) de profundidad.

- ✓ Medida del mismo punto variando la orientación de la base del densímetro (Figura 4.27): Se realiza una medición en un punto y sin retirar la varilla, se gira la base del aparato 90 grados, provocando un cambio de posicionamiento de los tubos detectores situados en la base del aparato (Figura 4.28). La finalidad del ensayo es estudiar la variabilidad de la medición en función del posicionamiento espacial de la base.

Fig. 4.27. Vista de la base del densímetro.

Fig. 4.28. Vista de las medidas realizadas en el mismo punto, variando la posición de la base del densímetro.

4.6.2.2. Repetitividad del aparato.

Con el propósito de conocer la fiabilidad del propio sensor del densímetro nuclear, se realizan simultáneamente una serie de medidas sobre el mismo punto, manteniendo así las mismas condiciones del entorno. Este ensayo es posible realizarlo gracias a la naturaleza no destructiva del propio aparato (Roberts et al., 1998, ASTM D6938, 2010), el cual permite medir varias veces el mismo punto sin alterar la estructura sedimentaria. Para tal fin, se realizaron dos series de medidas: una en la parte seca del perfil de la playa Victoria y otra en la zona intermareal (Figura 4.29).

Fig. 4.29. Vista de la toma de 5 medidas en el mismo punto de la playa emergida (izd) y del intermareal (der).

4.6.2.3. Tiempo de medición.

En este apartado se evaluará la importancia del tiempo de medición con el densímetro nuclear. Según la norma ASTM D6938 (2010), se debe realizar una medida de al menos 60 segundos. Para conocer el error cometido con un tiempo de medición inferior, se procedió a medir el mismo punto reiterativamente en la zona seca de la playa Victoria (P2 A) durante 60 y 15 segundos. Se han realizado 5 medidas consecutivas durante un periodo individual de 15 segundos y manteniendo el aparato en el mismo punto se ha medido durante un tiempo de 60 segundos

4.6.2.4. Efecto de la marea.

Con la finalidad de poder estudiar el efecto de la vaciante de marea en las medidas de densidad y humedad (posterior cálculo de la porosidad), se realizó un estudio temporal de dichas variables a lo largo de un periodo de 6 horas, siendo el tiempo que tarda la carrera de marea en pasar de la pleamar a la bajamar según los datos del mareógrafo instalado en las

instalaciones portuarias del Puerto de Cádiz, según el Anuario de Mareas publicado por el Instituto Hidrográfico de la Marina de la Armada Española (IHM, 2013). Para la consecución del estudio, se seleccionó el perfil transversal (P2) de la playa Victoria, donde se realizaron medidas horarias de densidad y humedad, a medida que bajaba la marea e iba descubriendo los puntos P2 Mberm, P2 M y P2 B. De esta forma, se pudo establecer la precisión de las medidas de densidad y humedad debida al momento de la bajamar, partiendo de la hipótesis de que según desciende el nivel freático del suelo de la playa, disminuye el contenido en agua o humedad.

4.7. Cálculo teórico de la porosidad de la arena.

Ya hemos visto que el concepto de porosidad se define como el volumen de poros o espacio dentro de una unidad de volumen de sedimento, mientras que el contenido de granos es la fracción de sedimento de dicho volumen. Según USACE (2002), la porosidad puede ser definida como la razón de poros respecto al volumen total, mientras que la densidad puede ser definida como la masa por unidad de volumen de un material, el cual es medido en kg/m^3 en el Sistema Internacional, aunque también es frecuentemente expresado en g/cm^3, del sistema cegesimal (CEDEX, 2008).

4.7.1. Porosidad de la arena con un mismo tamaño de grano

Para el cálculo teórico de la porosidad de un volumen de arena (l^3) con un tamaño de grano homogéneo (d), se puede establecer que dentro de ese volumen (l^3) cabe un determinado volumen de granos (d^3) (Figura 4.30).

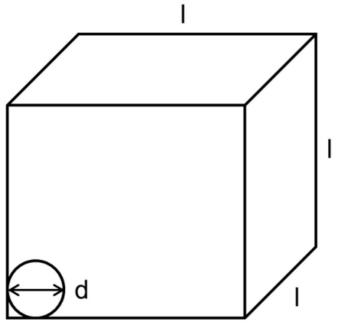


Fig. 4.30. Croquis de un volumen de arena (l^3) con un tamaño de grano homogéneo (d).

Por tanto, el volumen máximo ocupado por esos granos sería:

$$V_{granos} = (l/d)^3 \cdot V_{1grano} \quad (20)$$

Suponiendo un volumen de grano esférico:

$$4/3 \cdot \pi \cdot r^3 = 4/3 \cdot \pi \cdot (d/2)^3 = 4/3 \cdot \pi \cdot d^3/8 = (\pi \cdot d^3)/6 \quad (21)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior,

$$V_{granos} = (l^3/d^3) \cdot (\pi \cdot d^3)/6 = (\pi \cdot l^3)/6 \quad (22)$$

La porosidad es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total, siendo el volumen de huecos el volumen total menos el volumen de granos. Por tanto,

- Porosidad teórica = $V_{huecos}/V_{total} = (V_{total} - V_{granos})/V_{total} = (l^3 - (\pi\, l^3/6))/l^3 = 1 - \pi/6$ = 0,476 (47,6%)
- Contenido de grano teórico = 1 – 0,476 = 0,523 (52,3%)

4.7.2. Porosidad de la arena con diferentes tamaños de grano

Para el cálculo teórico de la porosidad de un volumen total de arena ($l^3 = V_{granos} + V_{huecos}$) con n tamaños de grano poco homogéneos (d_1, d_2, d_3,…, d_n), el volumen de granos sería:

$$V_{granos} = [l^3/(a \cdot d_1 + b \cdot d_2 + c \cdot d_3 + \ldots + z \cdot d_n)] \cdot \pi/6 \cdot [a\,(d_1)^3 + b\,(d_2)^3 + c\,(d_3)^3 + \ldots + z\,(d_n)^3]$$
$$= (\pi \cdot l^3)/6 \cdot [a \cdot (d_1)^3 + b \cdot (d_2)^3 + c \cdot (d_3)^3 + \ldots + z \cdot (d_n)^3)/(a \cdot d_1 + b \cdot d_2 + c \cdot d_3 + \ldots + z \cdot d_n]$$

Siendo a, b, c,…, z, el tanto por uno de aparición de ese diámetro en la masa de arena. Dichos parámetros se obtienen del análisis granulométrico, obteniendo un parámetro por cada uno de los tamices empleados en el análisis de tamizado por vía seca. En el caso de las arenas de playa, el tamaño de grano se encuentra entre 2 mm y 0,063 mm. Otras técnicas de análisis de arena podrían analizar tamaños de grano inferiores a las arenas finas (limos y arcillas), pero en el caso de la arena de las playas estudiadas, este porcentaje de finos es despreciable (<0,01%).

4.8. Cálculo teórico de la porosidad a partir de densidades medias.

La densidad del sedimento depende de la mineralogía del sedimento y de su composición. Los minerales encontrados comúnmente en las arenas medias de playa útiles para regeneraciones, incluyen cuarzo, feldespatos y carbonatos. La mayor concentración de minerales en sedimentos de ambientes costeros corresponde al cuarzo, puesto que es muy

abundante en la corteza terrestre y resistente a la erosión física y química. Según Gotthard (1997), Roberts et al. (1998); USACE (2002) y Van Rijn (2007), la densidad del cuarzo (2650 kg/m^3) y la del agua de mar (1025 kg/m^3) están comúnmente usadas en muchas formulaciones para representar la densidad media del sedimento costero y la densidad media del agua de mar. En el caso del Golfo de Cádiz, esas densidades medias también son las más aceptadas (Ciavola et al., 1998 y Muñoz-Pérez y Abarca, 2009). Según USACE (2002), el índice de poros de un volumen de arena estaría en torno a 0,4 (40%), y el 0,6 restante correspondería al volumen de granos. Asumiendo estos valores medios, y despreciando la densidad del aire, tenemos por tanto que la densidad de la masa de arena podría ser:

$$2650 \text{ kg/m}^3 \cdot 0{,}6 = 1590 \text{ kg/m}^3$$

En el caso de que el volumen de arena esté completamente saturado de agua de mar, la densidad de la masa quedaría:

$$1590 \text{ kg/m}^3 + (1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 0{,}4) = 2000 \text{ kg/m}^3$$

En el caso de que el volumen de arena esté parcialmente saturado de agua (50%), la densidad de la masa quedaría:

$$1590 \text{ kg/m3} + (1025 \text{ kg/m}^3 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}5) = 1800 \text{ kg/m3}$$

Bajo estas simples premisas se establecen unos valores medios de referencia para la densidad de 1590 kg/m^3 en arenas totalmente secas, de 1800 kg/m^3 en arenas saturadas de agua al 50% y de 2000 kg/m^3 en arenas completamente saturadas de agua. Entre ese rango la densidad, y por tanto, la porosidad de la arena puede variar en función del contenido de agua y de la compactación del sedimento.

4.9. Cálculo real de la porosidad a partir de la densidad medida in situ.

A pesar de los cálculos teóricos anteriormente anotados, la porosidad real de la arena de playa puede ser fácilmente calculada a partir de la densidad aparente medida en campo mediante el densímetro nuclear.

En esta investigación, la densidad de la masa de arena y la proporción de agua son obtenidas in situ mediante el uso de un densímetro nuclear, según la norma (ASTM D6938, 2010). Finalmente se ha optado por esta metodología al representar un cálculo real de la porosidad del sedimento a partir de medidas in situ de la densidad aparente (húmeda o seca) y del contenido en agua. De acuerdo con Chuhan et al., (2002), la densidad de la masa de arena es un fiel indicador de la compactación del sólido y está directamente relacionado con

su porosidad y permeabilidad. Adaptando la metodología descrita por Curry et al. (2004) para el uso del densímetro nuclear, hemos seleccionado tres componentes a estudiar: los granos sólidos, el agua y el aire presentes en la arena. De este modo, la densidad de la masa de arena viene dada por:

$$\rho_b = (\rho_s \times \alpha) + (\rho_w \times \beta) + (\rho_a \times \gamma) \tag{23}$$

Donde ϱ_b es la densidad húmeda del sedimento, ϱ_s es la densidad media del sólido (2650 kg/m^3), α es la concentración de granos en el volumen (valor a obtener), ϱ_w es la densidad media del agua de mar (1025 kg/m^3), β es el contenido de agua que nos da el densímetro, ϱ_a es la densidad media del aire, y γ es la proporción de aire en la masa estudiada.

En comparación con la densidad del sólido y la del agua de mar, la densidad del aire se considera despreciable, puesto que a nivel del mar, la densidad del aire es 1/800 la densidad del agua (Horowitz, 1976). Consecuentemente, la tercera componente en (23) sería aproximadamente cero. Por tanto, el contenido de granos podría expresarse de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\rho_b - (\rho_w \times \beta)}{\rho_s} \tag{24}$$

Sin embargo, según el densímetro nuclear utilizado, cabe la posibilidad que nos ofrezca directamente la densidad seca de la masa de arena (granos + aire) excluyendo la humedad. De este modo el cálculo del contenido de granos se simplificaría, quedando:

$$\alpha = \varrho_b / \varrho_s \tag{25}$$

En función del tipo de densidad obtenido (densidad húmeda o seca), el contenido en granos de la masa de arena puede ser calculado fácilmente. El volumen total de dicha masa es definido como la suma de la porosidad (η) y el contenido de granos (α). Por tanto, la porosidad puede definirse:

$$\eta = 1 - \alpha \tag{26}$$

Una vez obtenidos los resultados del densímetro nuclear, usando (24) ó (25) y (26), se puede calcular fácilmente la proporción de granos en el volumen de sedimento y la porosidad. En el caso que nos ocupa en esta investigación, la densidad obtenida con el densímetro fue la densidad seca, utilizando la formulación (25) y (26) para el cálculo del contenido de granos y porosidad, respectivamente.

4.10. Cálculo de diferencias absolutas y relativas.

Con cualquier parámetro obtenido en cada estación (densidad, porosidad, humedad, etc.) y para cada una de las campañas, se podrán calcular diferencias absolutas y relativas entre valores. Como diferencia absoluta de la porosidad, tomaremos la diferencia absoluta entre ambos valores, mientras que para el cálculo de la diferencia relativa entre valores de porosidad lo calcularemos como el valor siguiente restado al valor anterior, todo ello dividido por el valor de referencia (valor anterior), expresado en tanto por uno o en tanto por ciento. Cuando la diferencia relativa sea creciente, normalmente se expresará con un signo positivo (+) delante de la cifra, mientras que se utilizará el signo negativo (-) cuando la diferencia sea decreciente.

4.11. Recopilación de datos meteorológicos y marítimos.

Los datos meteorológicos y marítimos desde 2010 hasta 2013 han sido recopilados de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2013), del Anuario de Mareas publicado por el Instituto Hidrográfico de la Marina de la Armada Española (Ministerio de Defensa) así como del banco de datos de oceanografía y meteorología de la web de Puertos del Estado (2013). Especialmente, la recopilación y tratamiento de los datos marítimos es sumamente importante puesto que el oleaje y el nivel del mar son los principales parámetros hidrodinámicos que controlan la evolución del relleno de arena vertido en la playa (USACE, 2008). De hecho, los oleajes de tormenta y las variaciones del nivel del mar erosionan parte de la playa y distribuyen la arena transversal y longitudinalmente a lo largo de la playa (Dean, 2003).

Los datos del clima marítimo para las playas situadas en la cara atlántica de la provincia de Cádiz (Ballena, Victoria, Camposoto y Fontanilla) han sido recopilados de la boya 1320 de Cádiz (modelo triaxys), situada en aguas costeras (36.50 N; 6.33 O), de la boya y mareógrafo 3333 de Bonanza, situada en el morro del dique de abrigo de Bonanza, en la desembocadura del Río Guadalquivir (36.80 N; 6.34 O) y de la boya 2342 del Golfo de Cádiz (36.48 N; 6.96 O) situada en aguas abiertas (Figura 4.31). Para la playa de la Atunara situada en el Mar Mediterráneo, se han recopilado los datos existentes en la boya 2542 del Mar de Alborán, situada en aguas profundas (36.07 N; 5.23 O) y en el punto WANA 2006009 (36.13 N; 5.15 O) a través de la página de Puertos del Estado (2013). El conjunto de datos WANA está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje

procedentes de modelado numérico. Son por tanto datos que no proceden de medidas directas de la naturaleza.

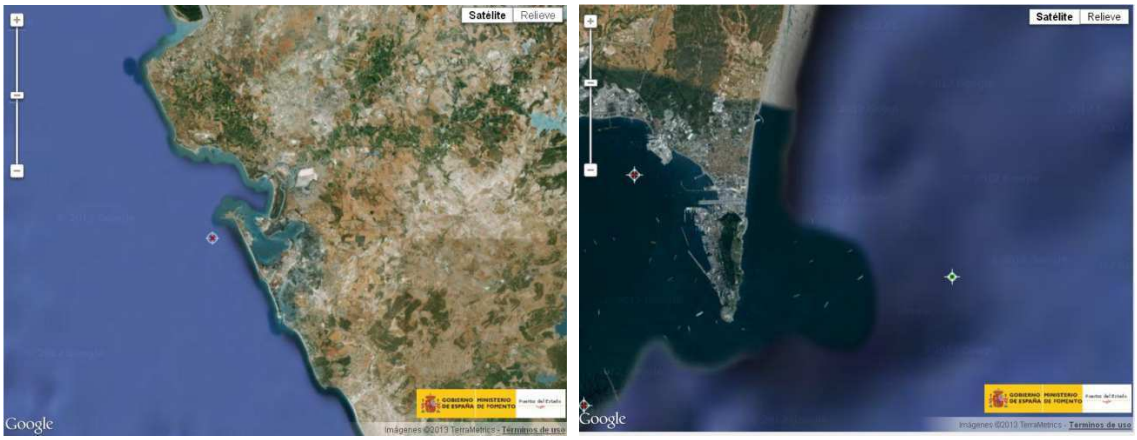


Fig. 4.31. Situación de la boya costera 1320 de Cádiz (izd.) y el punto WANA 2006009 situado al este de Gibraltar (der.). (Fuente: Web de Puertos del Estado, 2013).

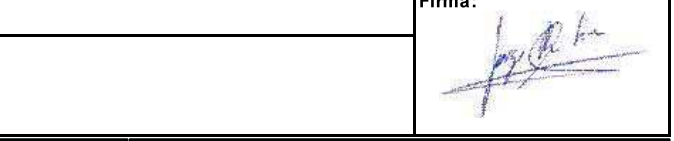
CAPÍTULO QUINTO

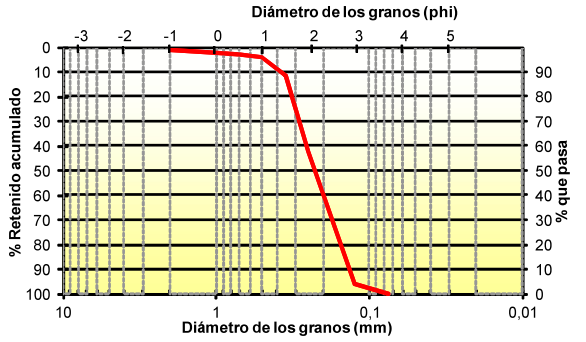
TÍTULO: PLAYA VALDELAGRANA					Coordenadas UTM ED50		X: 744083.410 Y: 4043120.185		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
MUESTRA:	Valdelagrana P1 M		Abril 2010		Tamaño (mm)	(%) Retenido	(%) Retenido Acumulado	(%) Que Pasa	Variable	Valor	Variable	Valor
Peso inicial muestra	157,08	gr.	Peso (gr)	% Peso	2	1,18	1,18	98,82	D50 (mm)	0,24	Φ50	2,06
					1	0,97	2,14	97,86	D84 (mm)	0,34	Φ84	1,56
>2 mm	1,85	gr.	1,84937	1,18	0,71	0,60	2,74	97,26	D16 (mm)	0,16	Φ16	2,64
2--1	1,52	gr.	1,51798	0,97	0,5	1,33	4,08	95,92	D95 (mm)	0,48	Φ95	1,06
1--0,71	0,94	gr.	0,94072	0,60	0,35	7,13	11,21	88,79	D5 (mm)	0,13	Φ5	2,94
0,71--0,5	2,10	gr.	2,09524	1,33	0,25	30,83	42,04	57,96	D75 (mm)	0,30	Φ75	1,74
0,5--0,355	11,20	gr.	11,20312	7,13	0,125	53,87	95,90	4,10	D25 (mm)	0,17	Φ25	2,56
0,355--0,250	48,43	gr.	48,4257	30,83	0,075	4,03	99,93	0,07	Moda (mm)	0,125	M(Φ)	2,09
0,250--0,125	84,61	gr.	84,61135	53,87	0	0,05	99,98	0,02	% Gruesos	1,18	θΦ (sorting)	0,59
0,125--0,075	6,33	gr.	6,32848	4,03					% Arenas	98,75	αΦ (skewness)	0,06
<0,075 mm	0,07	gr.	0,07483	0,05					% Finos	0,05	KΦ (kurtosis)	0,94
			157,05	99,98								

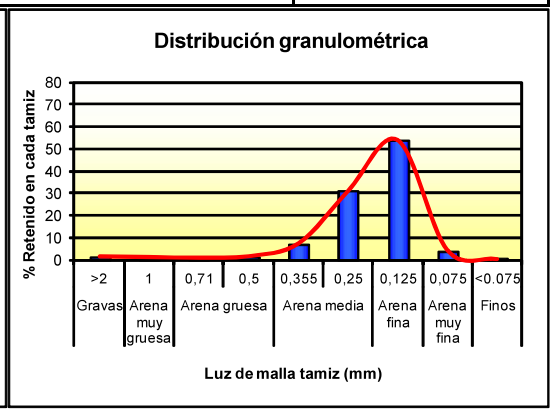
Peso final muestra	157,05	gr.
% FIABILIDAD	99,98	

Observaciones:

Firma:







RESULTADOS

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Resultados granulométricos.

En el ANEXO I, se pueden consultar los resultados de todos los análisis granulométricos realizados a las arenas de las playas estudiadas para cada campaña. Concretamente en este apartado se representan los resultados correspondientes a las muestras maestras de la arena nativa y de préstamo de cada una de las playas estudiadas. Como demostraron Medina et al. (1994), la granulometría de la muestra maestra puede ser representativa de la zona de playa analizada.

Tal y como se extrae de Román-Sierra et al. (2013), los errores cometidos debido a la propia metodología de la cata de arena y su posterior análisis es prácticamente insignificante. Asimismo, se comprobó que un tiempo de 10 minutos de tamizado es suficiente para obtener resultados precisos en los análisis granulométricos de arenas medias de playa.

En la Tabla 5.1, se presentan los principales parámetros estadísticos necesarios para la clasificación de la arena de playa en su estado nativo y de las zonas de préstamo: Tamaño medio de grano (D_{50}), diámetro por el que pasa el 84% de los granos (D_{84}), diámetro por el que pasa el 16% de los granos (D_{16}), desviación típica (*sorting*), simetría (*skewness*) y el apuntamiento (*kurtosis*). Asimismo, en la Tabla 5.2 se pueden consultar los mismos parámetros resultantes en el estado final de las playas.

Tabla 5.1. Principales parámetros obtenidos tras el análisis granulométrico de las muestras maestras de arena nativa de las playas estudiadas y zonas de préstamo.

Playas	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{16} (mm)	*Sorting* (φ)	*Skewness* (φ)	*Kurtosis* (φ)
La Ballena	0,34	0,80	0,19	1,13	3,09	1,68
Valdelagrana	0,24	0,34	0,16	0,59	0,06	0,94
Victoria	0,24	0,42	0,16	0,81	1,58	1,20
Camposoto	0,27	0,60	0,16	1,12	4,10	1,32
Fontanilla	0,21	0,33	0,16	0,58	0,61	1,07
El Palmar	0,28	0,39	0,17	0,60	-0,34	0,87
Atunara	0,59	1,00	0,28	1,32	0,75	0,68
Placer Meca	0,32	0,71	0,16	0,88	-0,24	0,96
Cantera "El Palmar"	0,49	1,00	0,28	1,03	0,80	1,14
Puerto Conil	0,25	0,44	0,17	0,69	0,63	0,90
Puerto Atunara	0,37	1,30	0,22	1,26	4,04	1,19

Tabla 5.2. Principales parámetros obtenidos tras el análisis granulométrico de las muestras maestras correspondientes a la arena de la última campaña.

Playas	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{16} (mm)	*Sorting* (φ)	*Skewness* (φ)	*Kurtosis* (φ)
La Ballena	0,27	0,61	0,16	1,15	3,31	1,20
Victoria	0,26	0,39	0,16	0,67	0,25	0,98
Camposoto	0,28	0,70	0,17	1,08	3,05	1,04
Fontanilla	0,22	0,35	0,16	0,59	0,61	0,92
Atunara	0,49	2,00	0,27	1,31	2,58	0,70

Una vez regeneradas las playas el tamaño medio de grano ha aumentado considerablemente en casi todas las playas. Pasado un tiempo prudencial de varios meses, se ha podido comprobar como los parámetros estadísticos tienden a recuperar valores similares a la arena nativa. No obstante, se han detectado cambios significativos en el tamaño medio de grano nativo, como los casos de las playas Ballena y Atunara. En ambas playas, la arena de préstamo ha sido de menor tamaño medio que la nativa, por lo que la tendencia decreciente ha sido recuperar una granulometría con un tamaño medio más natural que el presentado por las playas en su estado erosivo (Figura 5.1).

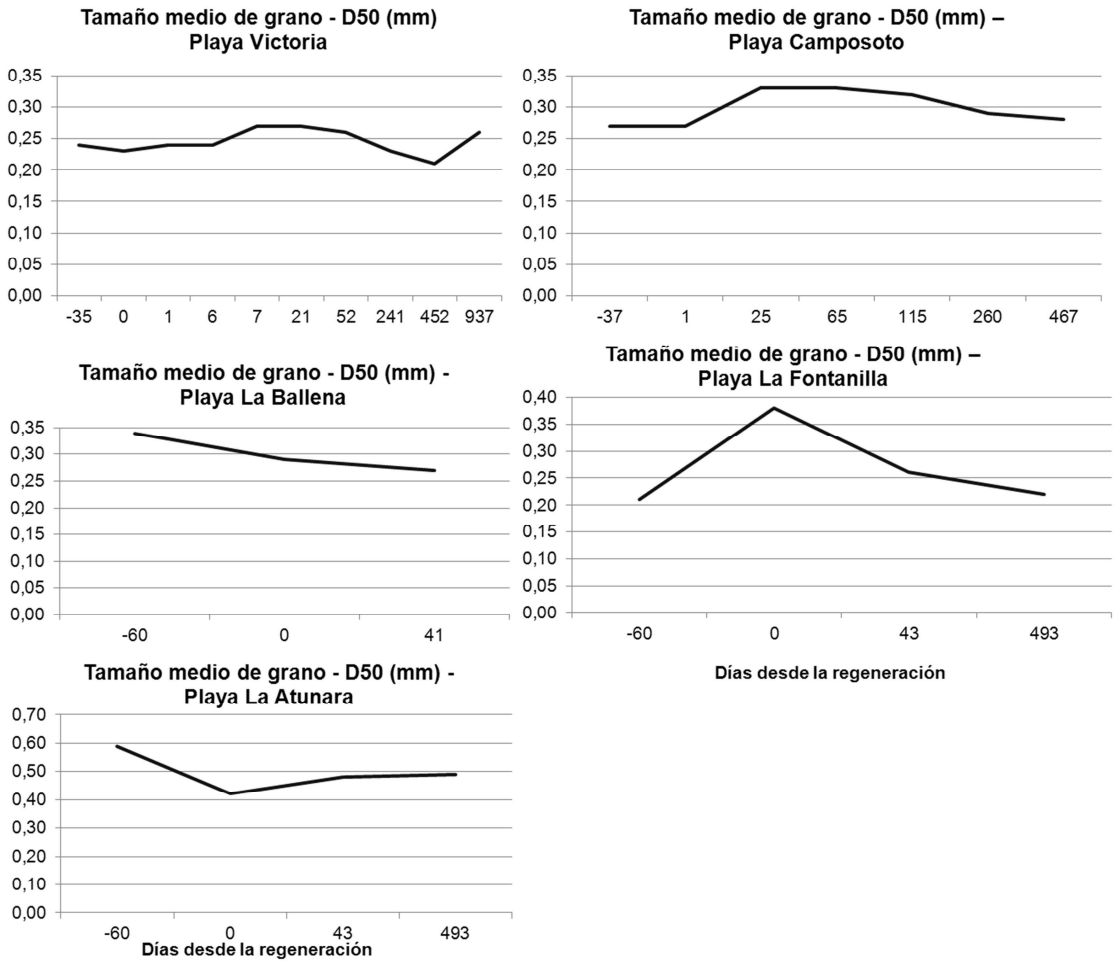


Fig. 5.1. Evolución del tamaño medio de grano de arena de las playas estudiadas a lo largo del tiempo.

En relación a los resultados obtenidos de *sorting*, *skewness* y *kurtosis*, se pueden clasificar las arenas según las variables publicadas por USACE (2002) (Figura 4.7). En la Tabla 5.3 se muestra la clasificación de la arena de cada una de las playas estudiadas, en su estado final, considerando para ello la muestra maestra de todos los perfiles.

Tabla 5.3. Clasificación de las muestras maestras correspondientes a las zonas de préstamo utilizadas y a las arenas de las playas en su estado final.

Playas	Clasificación del sedimento
La Ballena	Arenas medias (D_{50}=0,27 mm) de distribución pobremente clasificada (*sorting*=1,15 φ), sesgada en muy finos (*skewness*=3,31 φ) y leptocúrtica (*kurtosis*=1,20φ).
Valdelagrana	Arenas medias (D_{50}=0,24 mm) de distribución moderadamente bien clasificada (*sorting*=0,59 φ), simétrica (*skewness*=0,06 φ) y mesocúrtica (*kurtosis*=0,94 φ).
Victoria	Arenas medias (D_{50}=0,26 mm) de distribución moderadamente bien clasificada (*sorting*=0,67 φ), sesgada en finos (*skewness*=0,25 φ) y mesocúrtica (*kurtosis*=0,98 φ).
Camposoto	Arenas medias (D_{50}=0,28 mm) de distribución pobremente clasificada (*sorting*=1,08 φ), muy sesgada en finos (*skewness*=3,05 φ) y mesocúrtica (*kurtosis*=1,04 φ).
Fontanilla	Arenas medias (D_{50}=0,22 mm) de distribución moderadamente bien clasificada (*sorting*=0,59 φ), muy sesgada en finos (*skewness*=0,61 φ) y mesocúrtica (kurtosis=0,92 φ).
El Palmar	Arenas medias (D_{50}=0,28 mm) de distribución moderadamente bien clasificada (*sorting*=0,60 φ), muy sesgada en gruesos (*skewness*=-0,34 φ) y platicúrtica (*kurtosis*=0,87 φ).
Atunara	Arenas medias y gruesas (D_{50}=0,49 mm) de distribución pobremente clasificada (*sorting*=1,31 φ), muy sesgada en finos (*skewness*=2,58 φ) y platicúrtica (*kurtosis*=0,70 φ).
Placer Meca	Arenas medias (D_{50}=0,32 mm) de distribución moderadamente clasificada (*sorting*=0,88 φ), muy sesgada en gruesos (*skewness*=-0,24 φ) y mesocúrtica (*kurtosis*=0,96 φ).
Cantera "El Palmar"	Arenas medias y gruesas (D_{50}=0,49 mm) de distribución pobremente clasificada (*sorting*=1,03 φ), sesgada en muy finos (*skewness*=0,80 φ) y leptocúrtica (*kurtosis*=1,14 φ).
Puerto Conil	Arenas medias (D_{50}=0,25 mm) de distribución moderadamente bien clasificada (*sorting*=0,69 φ), muy sesgada en finos (*skewness*=0,63 φ) y mesocúrtica (*kurtosis*=0,90 φ).
Puerto Atunara	Arenas medias y gruesas (D_{50}=0,37m) de distribución pobremente clasificada (*sorting*=1,26 φ), muy sesgada en finos (*skewness*=4,04 φ) y leptocúrtica (*kurtosis*=1,19 φ).

5.2. Análisis y comparación de los resultados de porosidad obtenidos con distintas metodologías.

En este apartado se analizarán los resultados de todas las técnicas utilizadas para la determinación de la porosidad, con el fin de poder seleccionar el método más preciso para la toma de datos a lo largo de las campañas planificadas.

5.2.1. Ensayos realizados con los cores de PVC

Tras la realimentación de playa de La Fontanilla (T.M. Conil de la Frontera) en el año 2008, con arenas medias (D_{50} aproximado de 0,25 mm) procedentes del dragado del Puerto de Conil en Cabo Roche, se realizó una prospección horizontal con el core de PVC en la zona seca de la playa, según lo descrito en la metodología. En este caso se introdujo un total de 43 cm (43/50) de tubo (Figura 5.2).

$$\text{Volumen bruto arena inicial} = 3{,}1416 \cdot 5{,}5\ \text{cm}^2 \cdot 43\ \text{cm} = 4086{,}44\ \text{cm}^3$$

Fig. 5.2. Vista del tubo de PVC insertado horizontalmente (izd) y enrasado tras su extracción (der).

Tras su traslado al laboratorio, se procedió al vertido de toda la arena en un recipiente tipo piscina con un total de 4000 cm^3 de agua en su interior. Se vertieron 1000 cm^3 más de agua por las paredes interiores del tubo con el fin de arrastrar todos los granos de arena dentro del tanque. Una vez mezclada la arena con el agua, el volumen total fue de aproximadamente de 7800 cm^3. El porcentaje de volumen de agua intersticial presente en la muestra de arena natural se determinó en un 2,8% del volumen bruto de la arena inicial (4086,44 cm^3), es decir 114,42 cm^3. Según la metodología descrita en el capítulo 4:

$$V_{granos} = V_{total} - V_{agua\ inicial} - V_{agua\ intersticial} = 7800\ \text{cm}^3 - 5000\ \text{cm}^3 - 114{,}42\ \text{cm}^3$$

$$V_{granos} = 2685{,}58\ cm^3$$

$$V_{poros} = V_{bruto\ arena} - V_{granos} = 4086{,}44\ cm^3 - 2685{,}58\ cm^3$$
$$V_{poros} = 1400{,}86\ cm^3$$

Por lo tanto, el índice de granos y de poros quedaría:

$$Índice_{granos}\ (a) = V_{granos} / V_{bruto\ arena} = 2685{,}58\ cm^3 / 4086{,}44\ cm^3$$
$$\mathbf{Índice_{granos}\ (a) = 0{,}6572\ (65{,}72\%)}$$

$$Índice_{poros}\ (p) = (V_{poros} / V_{tubo}) = (1 - a) = 1 - 0{,}6572$$
$$\mathbf{Índice_{poros}\ (p) = 0{,}3428\ (34{,}28\%)}$$

Estos índices de granos y poros resultantes suponen una diferencia relativa del 9,53% y del 14,3% respecto a los valores propuestos por otros autores (USACE, 2002) que asumen un índice de granos y de poros de 0,60 y 0,40 respectivamente. Asimismo, la metodología de los cores de PVC resulta poco práctica dado el gran tamaño de muestra de arena a catar, su traslado y su manipulación. Además la lectura visual del agua desplazada en el tanque no resulta muy precisa debido a que las marcas de volumen en una superficie de 25 x 20 cm son muy estrechas. Las marcas de volumen están señaladas en el tanque cada 0,5 cm, con lo que se podría cometer un error en la lectura del volumen de hasta 250 cm^3. Respecto al volumen de arena tomado con el core de PVC, esta limitación supondría un error en el índice de granos y poros superior al ±6%.

5.2.2. Ensayos realizados con las probetas

La técnica de las probetas de plástico ha sido utilizada para medir la porosidad de la arena (mediante diferencia de volúmenes) en las playas de La Fontanilla (T.M. Conil de la Frontera), El Palmar (T.M. Vejer de la Frontera) y Valdelagrana (T.M. Puerto de Santa María).

En un principio, las muestras tomadas en la playa de La Fontanilla (probetas A, B y C) se clavaron las probetas en **sentido horizontal** permitiendo obtener muestras de sedimento a diferentes profundidades, según el corte realizado en el estrato de arena de la zona seca (supramareal) de la playa (Figura 5.3).

Fig. 5.3. Vista del corte vertical dado en el estrato de arena en la playa de La Fontanilla. Potencia: 50 cm.

No obstante, a mayor profundidad de sondeo existe una mayor dificultad a la hora de introducir la probeta manualmente y sin golpeteos. De hecho, en el caso de la arena vertida en la playa de La Fontanilla, apenas se consiguió clavar 1/5 de la probeta a una profundidad de 0,4 m, obteniendo un volumen muy escaso de arena (216 cm^3). En cambio, a una profundidad más somera, en torno a los 0,1 m de profundidad, la probeta se pudo introducir completamente y sin golpes (1000 cm^3 de enrase + 216 cm^3 desde el enrase hasta el borde superior), aunque la potencia del sedimento estudiado fue reducida (Figura 5.4).

Fig. 5.4. Imagen de las diferentes profundidades (0,1 y 0,4 m) de cata donde se puede observar la probeta introducida en su totalidad.

Con el fin de recoger una muestra mayor y más representativa de la columna de arena de la playa La Fontanilla, se introdujo la probeta manualmente en **sentido vertical** y sin golpeteos, recogiendo 416 cm^3 de arena hasta una profundidad de 0,15 m (probeta A). Con suaves golpeteos se consiguió clavar la probeta hasta su colmatación (1216 cm^3 de arena), abarcando una potencia de 0,4 m de sedimento (probeta B). De esta manera, se pudo obtener un volumen de material en una capa de arena muy representativa de la dinámica litoral al estar afectado por la removilización del sedimento debido al oleaje (Ferreira et al., 2000; Anfuso, 2005) y las mareas (Muñoz-Perez y Medina, 2000). No obstante, y con el fin de estimar la variación en la porosidad interna del sedimento que se provoca cuando se introduce la probeta con y sin golpeteos, se realizó un ensayo simultáneo con dos probetas (Figura 5.5). La probeta que se clavó con golpeteos se introdujo totalmente pudiendo sacar un mayor volumen de muestra, mientras que la otra sólo fue introducida parcialmente, obteniendo una menor cantidad de muestra (Figura 5.6).

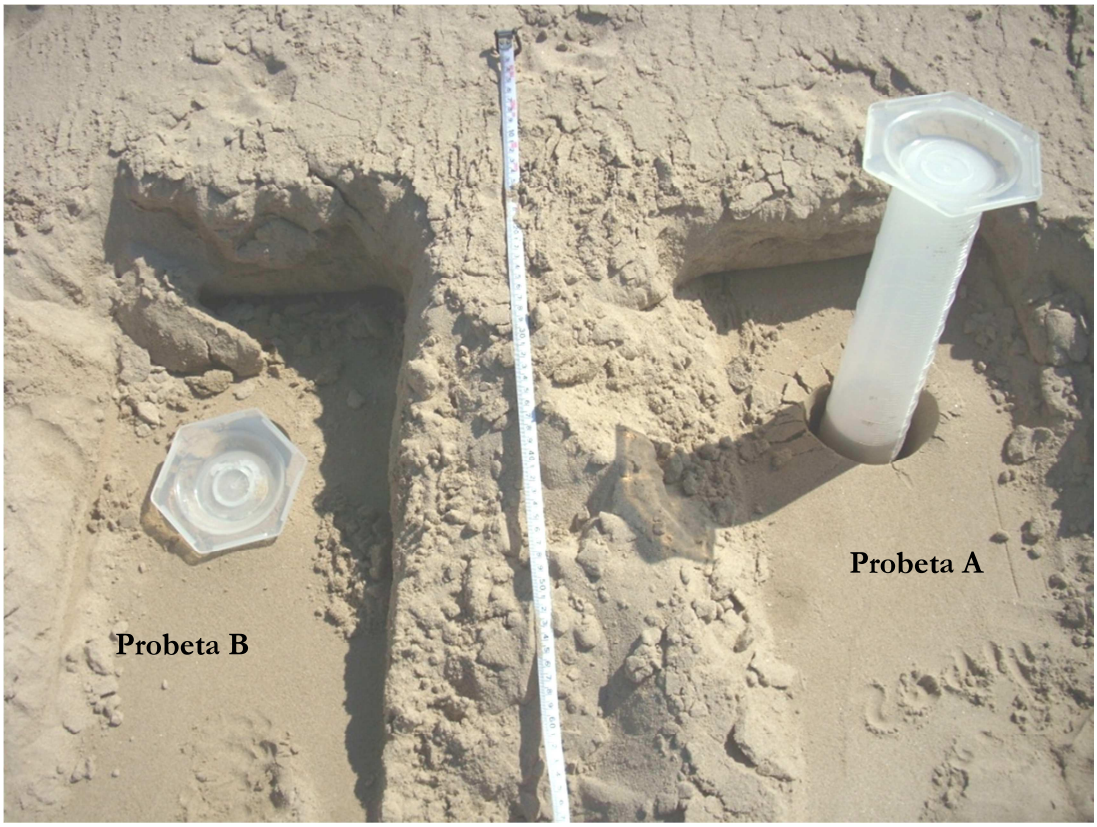


Fig. 5.5. Vista de las probetas introducidas verticalmente en el sedimento con golpeteos (izd. Probeta B) y sin golpeteos (der. Probeta A)

Fig. 5.6. Vista de las catas obtenidas verticalmente con golpeteos (izd. Probeta B) y sin golpeteos (der. Probeta A)

El vacío generado por la arena húmeda dentro de la probeta facilitó que todo el material se mantuviera dentro de ésta al extraerla del sedimento. En el caso de que la arena se encuentre extremadamente seca o húmeda, no se origina dicho vacío por lo que sería posible alguna pérdida de muestra. La posterior caída masiva y reacomodación de la arena dentro de las probetas se muestra como un factor intrascendente puesto que el volumen de arena introducido se anota con antelación.

- Probeta A: Introducida con fuerza continua sin golpeteos.

- Volumen arena inicial: 416 cm^3.
- Volumen agua añadida: 200 cm^3.
- Porcentaje de agua intersticial: 2,8% (11,65 cm^3)

Como la probeta no está colmatada, permite introducir una varilla de metal y agitar la mezcla con el fin de que el agua vaya rellenando los huecos intersticiales sustituyendo al aire (Figura 5.7). Para una mejor agitación se utiliza la vibración de la tamizadora electromagnética durante 10 minutos. Con esta vibración también resulta más fácil introducir la varilla en la probeta con el fin de agitar manualmente la mezcla.

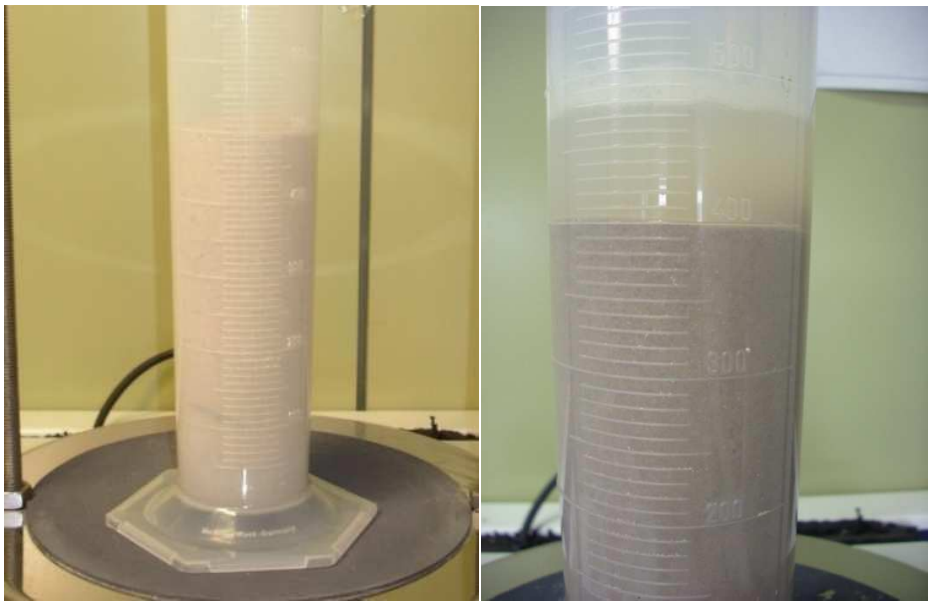


Fig. 5.7. Muestra analizada en laboratorio antes (izd.) y después a la adición de agua y agitación (der.). Nótese el cambio de volumen de arena y las dos fases agua-arena (der)

Tras un tiempo prudencial de varios minutos hasta conseguir la mayor sedimentación posible, se obtiene:

- Volumen de granos + agua intersticial + agua admitida: 405 cm^3 (Tras la agitación y sedimentación).

- Volumen de agua excedente: 75 cm^3.

- Volumen de agua admitida = 200 – 75 = 125 cm^3 (agua que ha rellenado los huecos de aire).

$$V_{granos} = V_{granos+agua\ intersticial+agua\ admitida} - V_{agua\ intersticial} - V_{agua\ admitida} =$$
$$= 405\ cm^3 - 11{,}65\ cm^3 - 125\ cm^3$$
$$V_{granos} = 268{,}35\ cm^3$$

$$V_{poros} = V_{inicial} - V_{granos} = 416\ cm^3 - 268{,}35\ cm^3$$
$$V_{poros} = 147{,}65\ cm^3$$

Por tanto, conocido el volumen de granos y de poros de la muestra de arena, se puede calcular el índice de granos (a) y el índice de poros o porosidad (p) para la muestra de la probeta A (introducida sin golpeteos).

$$Índice_{granos}\ (a) = V_{granos} / V_{inicial} = 268{,}35\ cm^3 / 416\ cm^3$$
$$\mathbf{Índice_{granos}\ (a) = 0{,}6451\ (64{,}51\%)}$$
$$Índice_{poros}\ (p) = (V_{poros} / V_{inicial}) = (1 - a)$$
$$\mathbf{Índice_{poros}\ (p) = 1 – 0{,}6451 = 0{,}3549\ (35{,}49\%)}$$

➢ Probeta B: Introducida en su totalidad ayudado por golpeteos.

- Volumen arena inicial: 1216 cm^3.

- Porcentaje de agua intersticial: 2,8% (34,05 cm^3)

- Volumen agua añadida y admitida: 379 cm^3.

Nota: El agua ha sido añadida lentamente para no provocar el rebose (overflow) de la mezcla, hasta el límite de admisión del sedimento. El agua ha ido rellenando los huecos de aire y expulsando éste al exterior (Figura 5.8).

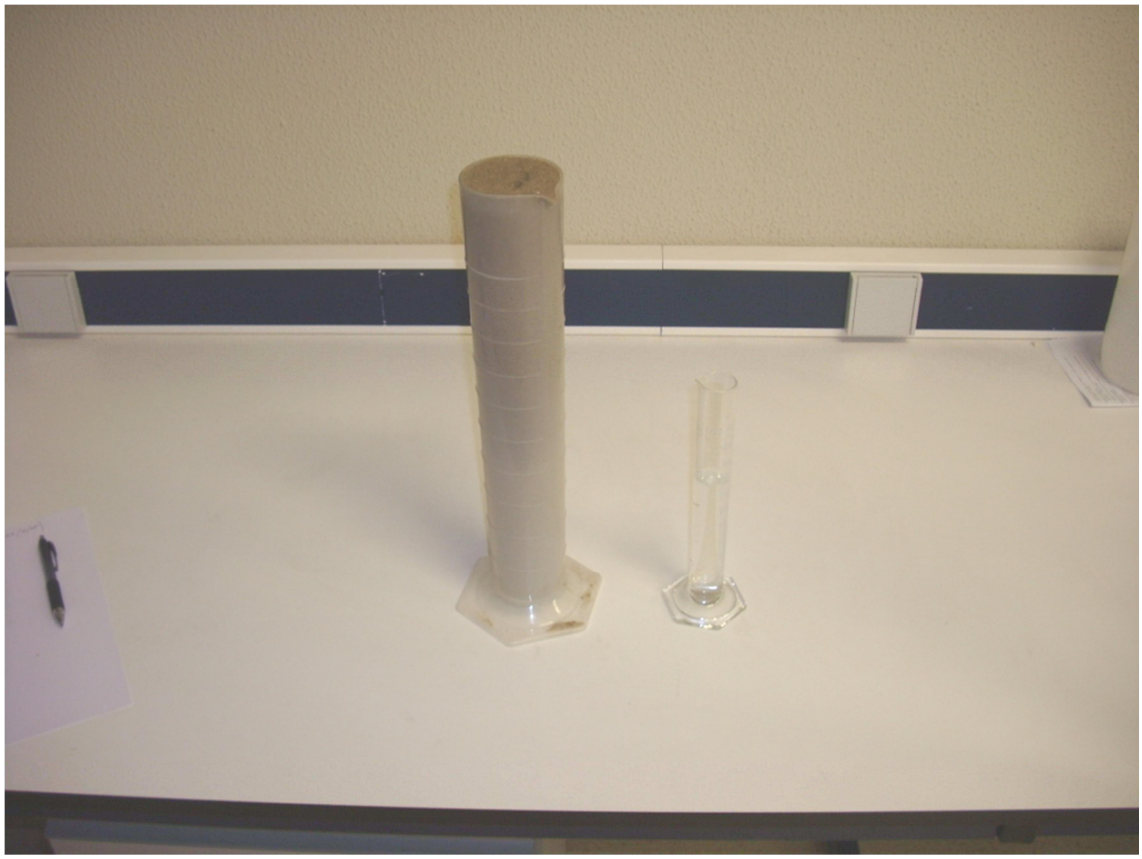


Fig. 5.8. Probeta B en laboratorio tras colmatar el sedimento de agua

De esta manera es posible calcular fácilmente el volumen de granos de la muestra, puesto que todo el agua añadida equivale a los huecos de aire existentes (el agua desplaza al aire), exceptuando el contenido de humedad natural de la muestra, es decir, el agua intersticial. En este caso sería:

$$V_{granos} = V_{arena\ inicial} - V_{agua\ añadida} - V_{agua\ intersticial} = 1216\ cm^3 - 379\ cm^3 - 34{,}05\ cm^3$$

$$V_{granos} = 802{,}95\ cm^3$$

Conocido el volumen de granos de la muestra de arena, se puede calcular, de forma similar al caso anterior, el índice de granos (a) y el índice de poros (p) para la muestra de la probeta B (introducida con golpeteos).

$$Índice_{granos}\ (a) = 802{,}95\ cm^3 / 1216\ cm^3$$

$$\mathbf{Índice_{granos}\ (a) = 0{,}6603\ (66{,}03\%)}$$

$$Índice_{poros}\ (p) = 1 - a = 1 - 0{,}6603$$

$$\mathbf{Índice_{poros}\ (p) = 0{,}3397\ (33{,}97\%)}$$

Tras los resultados de porosidad obtenidos con la penetración de probetas con y sin golpeteos, en la Tabla 5.4, se pueden observar las diferencias obtenidas en la porosidad utilizando ambas técnicas.

Tabla 5.4. Resumen de resultados del índice de granos y poros tras la penetración de las probetas con (probeta B) y sin golpeteos (probeta A) en la arena de la playa La Fontanillla.

	Probeta A (sin golpeteos)	Probeta B (con golpeteos)	Diferencia absoluta
Índice de granos (a)	0,6451	0,6603	0,0152
Índice de poros (b)	0,3549	0,3397	

La diferencia absoluta encontrada en la porosidad entre ambas muestras es de 0,0152 (1,52%). Como era de esperar, la porosidad hallada en la probeta B es menor, posiblemente debido a la alteración de la estructura interna del sedimento cuando la probeta es introducida a la fuerza mediante golpeteos.

Con la finalidad de poder ampliar estos resultados por reiteración, se procedió a repetir la metodología de toma de muestra sin golpeteos en el mismo punto (Figura 5.9): en la zona seca de la playa de La Fontanilla (probeta C). Asimismo, se tomó muestra en la zona seca de la cercana playa de El Palmar (probeta D).

- Probeta C: Introducida manualmente con fuerza continua sin golpeteos.

- Volumen inicial arena: 426 cm^3.
- Volumen agua añadida: 200 cm^3.
- Porcentaje de agua intersticial: 2,8% (11,93 cm^3)

Tras la correspondiente agitación, se espera un tiempo prudencial, obteniendo los siguientes resultados:

- Volumen de granos + agua intersticial + agua admitida: 415 cm^3 (Tras la agitación y sedimentación).
- Volumen de agua excedente: 70 cm^3.
- Volumen de agua admitida = 200 – 70 = 130 cm^3 (agua que ha rellenado los huecos de aire).

$$V_{granos} = 415\ cm^3 - 11{,}93\ cm^3 - 115\ cm^3$$
$$V_{granos} = 288{,}07\ cm^3$$

$$V_{poros} = 426\ cm^3 - 288{,}07\ cm^3$$
$$V_{poros} = 137{,}93\ cm^3$$

$Índice_{granos}$ (a) = 0,6762 (67,62%)

$Índice_{poros}$ (p) = 1 – 0,6762 = 0,3238 (32,38%)

Fig. 5.9. Detalle de la lectura de arena obtenida y extracción al vacío de la cata

➢ <u>Probeta D:</u> Introducida manualmente con fuerza continua sin golpeteos.

- Volumen arena inicial: 420 cm^3 (Figura 5.10).
- Volumen agua añadida: 200 cm^3.
- Porcentaje de agua intersticial: 4,6% (19,32 cm^3)

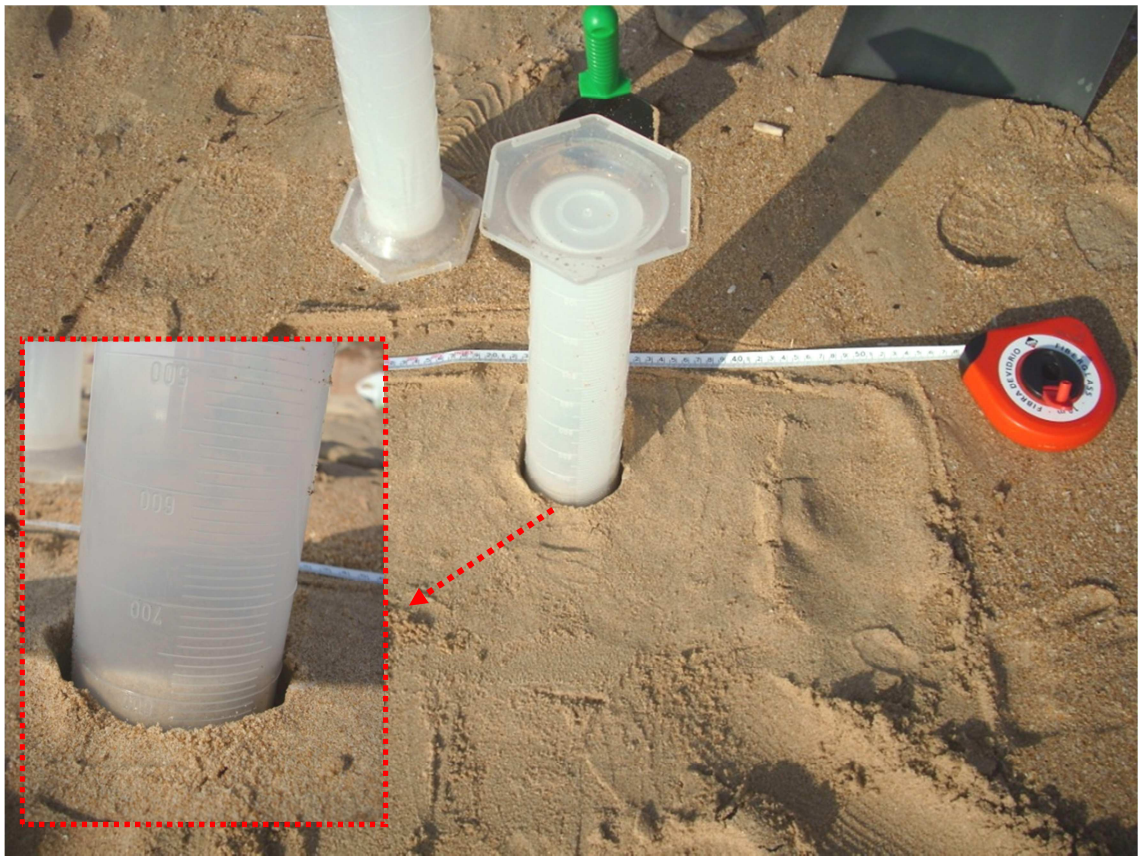


Fig. 5.10. Vista del sedimento introducido en la probeta y detalle de lectura en la playa de El Palmar.

Después de la agitación de la mezcla en el laboratorio y tras esperar la sedimentación, se han obtenido los siguientes resultados:

- Volumen de granos + agua intersticial + agua admitida: 390 cm^3.
- Volumen de agua excedente: 80 cm^3.
- Volumen de agua admitida = 200 – 80 = 120 cm^3 (agua que ha rellenado los huecos de aire).

$$V_{granos} = 390\ cm^3 - 19{,}32\ cm^3 - 120\ cm^3$$
$$V_{granos} = 250{,}68\ cm^3$$

$$V_{poros} = 420\ cm^3 - 250{,}68\ cm^3$$
$$V_{poros} = 169{,}32\ cm^3$$

$Índice_{granos}$ (a) = 0,5969 (59,69%)

$Índice_{poros}$ (p) = 1 – 0,5969 = 0,4031 (40,31%)

Con la finalidad de realizar un estudio más amplio de la variabilidad espacial de la porosidad en diferentes puntos del perfil transversal de playa, se aplicó la metodología de las probetas en dos perfiles (P1 y P2) en la playa de Valdelagrana (T.M. Puerto de Santa María) durante la bajamar. En cada perfil se establecieron 3 estaciones de muestreo: zona de arena seca (A), zona media del intermareal (M) y zona próxima a la bajamar (B). Ambos perfiles estaban distanciados unos 50 metros. Con el objetivo de minimizar el error, las tres zonas del perfil 1 se midieron por triplicado. Por lo tanto se tomaron un total de 9 muestras con probetas de una capacidad máxima de 0,5 litros en los puntos del perfil 1: P1AI, P1AII, P1AIII, P1MI, P1MII, P1MIII, P1BI, P1BII, P1BIII; y un total de 3 probetas con una capacidad máxima de 1 litro en los puntos del perfil 2: P2A, P2M y P2B. Utilizando la misma metodología desarrollada anteriormente, se calculó el porcentaje de humedad o agua intersticial para cada una de las zonas, siendo A (3,5%), M (20,8%) y B (22,8%). También se calcularon los índices de granos y de poros para cada una las muestras catadas con las probetas (Tabla 5.5). Paralelamente a las mediciones con las probetas de diferente capacidad, se realizaron mediciones con el densímetro nuclear para su posterior comparación.

Tabla 5.5. Resultados obtenidos con las probetas en la playa de Valdelagrana.

PUNTO	Arena catada (cm^3)	Agua añadida (cm^3)	Agua excedente (cm^3)	Vol. granos (cm^3)	Vol. poros (cm^3)	Índice granos	Índice poros
P1AI	170	210	150	104	66	0,61	0,39
P1AII	150	100	58	103	47	0,69	0,32
P1AIII	130	100	61	86	44	0,67	0,34
P1MI	120	100	64	59	61	0,49	0,51
P1MII	135	100	80	87	48	0,64	0,36
P1MIII	110	100	75	62	48	0,56	0,44
P1BI	170	100	70	101	69	0,60	0,40
P1BII	175	100	70	105	70	0,60	0,40
P1BIII	140	100	88	96	44	0,69	0,31
P2A	220	200	142	154	66	0,70	0,30
P2M	100	200	180	59	41	0,59	0,41
P2B	280	200	170	186	94	0,66	0,34
Media P1A	150	137	90	98	52	0,65	0,35
Media P1M	122	100	73	69	52	0,57	0,43
Media P1B	162	100	76	101	61	0,63	0,37
D. Típica P1A	20	64	52	10	12	0,04	0,04
D. Típica P1M	13	0	8	15	7	0,08	0,08
D. Típica P1B	19	0	10	5	15	0,05	0,05

El índice de granos y poros calculado para ambos perfiles oscilaron entre un índice de granos máximo de 0,70 en el P2A (índice de poros de 0,30) y un mínimo de 0,49 en el P1MI (porosidad de 0,51). Los datos ofrecen una destacada variabilidad en el cálculo de ambos índices, con una desviación típica de hasta el 8% en la zona intermareal.

Con el objetivo de poder contrastar los resultados obtenidos con las diferentes probetas en las zonas secas de las playas de La Fontanilla (probetas A, B y C), El Palmar (probeta D), y zona seca (A) del perfil 1 (valores medios) de la playa de Valdelagrana, en la Tabla 5.6 se presenta un resumen de todos los datos.

Tabla 5.6. Resumen de resultado del índice de granos y porosidad obtenido mediante el método de las probetas.

Probetas	Potencia sedimento (m)	Arena catada (cm^3)	Índice granos (a)	Índice poros (p)	Difer. relativa* a / p (%)
A	0,15	416	0,645	0,355	7,5 / -11,2
B	0,40	1246	0,660	0,340	10,0 / -15,0
C	0,15	426	0,676	0,324	12,7 / -19,0
D	0,15	420	0,597	0,403	-0,5 / 0,7
P1A	0,10	150	0,650	0,350	8,3 / -12,5
Media	0,19	532	0,646	0,354	7,6 / -11,4

* Diferencia relativa calculada respecto al índice de granos (a) y de poros (p) publicados por USACE, 2002.

Tras la obtención de estos primeros resultados, valoramos las cifras calculadas. Según USACE (2002) para las arenas medias litorales se ha estimado un valor de referencia medio de índice de granos a = 0,6 y un valor de porosidad de p = 0,4. Tanto con la probeta A como con la probeta B, con diferente metodología de cata pero mismo análisis en laboratorio, se obtienen índices bastante similares. En este caso, cabe destacar que el hecho de recoger mayor muestra de sedimento con la probeta B, no supuso una menor diferencia relativa respecto a los índices de referencia anteriormente citados.

Todos los índices se muestran relativamente diferenciados respecto a esos valores de referencia, llegando a observarse diferencias de hasta un 12 y un 19% en el cálculo del índice de granos y poros respectivamente. El hecho de recoger mayor muestra de sedimento, no supuso una mayor similitud con los índices de granos y poros de referencia de 0,6 y 0,4 respectivamente.

En términos estrictos de variación de volumen bruto de arena y volumen neto de granos, se ha realizado un sencillo experimento empírico en campo y laboratorio: Justamente tras extraer la probeta al vacío del suelo y darle la vuelta, la arena cae desordenada y masivamente dentro de la probeta (de igual forma que cuando se vierte directamente para la regeneración de una playa). Visualmente, se ha medido in situ con las probetas, que dicho volumen ocupa de media un 35% más de volumen. Para una mayor precisión, se ha medido ese aumento de volumen en el laboratorio. En el caso de la probeta A tras la extracción y girado de la misma, se ha pasado de un volumen bruto catado de 416 cm^3 (arena + aire + agua intersticial) a un volumen bruto de 560 cm^3 (+25,7% respecto al volumen anterior), únicamente por el volcado de la propia arena. Dicho aumento de volumen se debería únicamente a la diferente disposición de los granos tras su caída

masiva, al igual que en un vertido durante una regeneración de playa. Según diversos autores (Graton y Fraser, 1935, Gaither, 1953, Pryor, 1973, Dickinson y Ward, 1994, Curry et al., 2004), la colocación de los granos depende, entre otros factores, del tamaño y forma de grano, así como de la composición y clasificación de la arena.

Tras las vibraciones debidas al traslado a laboratorio y su manipulación, el volumen se ha reducido visualmente hasta 500 cm^3 (-12,0% respecto al volumen anterior). Tras la adición de agua, la cual rellena los huecos de aire y la agitación que permite la salida del mismo, se ha obtenido un volumen (granos + agua intersticial + agua admitida) de 405 cm^3 (-23,5% respecto al volumen anterior), que restando el agua intersticial (11,65 cm^3) y el agua admitida (125 cm^3), queda un volumen neto de granos igual a 268,35 cm^3, es decir, -50,9% respecto al volumen anterior y -55,0% respecto al volumen inicial tomado en la arena nativa. Todos estos valores y su variabilidad pueden consultarse en la Tabla 5.7. Estos datos parecen sostener la hipótesis de partida de esta Tesis Doctoral.

Tabla 5.7. Variación del volumen de arena medido en el laboratorio mediante el método de las probetas.

Estado	**Volumen medido (cm^3)**	**Variación (%)**
Medido en arena nativa	416	
Giro y vuelco en probeta	560	+25,7
Traslado a laboratorio	500	-12,0
Añadido agua y agitado	405	-23,5
Volumen granos neto	268	-50,9
Variación volumen total*	148	-55,0

* Variación de volumen bruto medido en la arena nativa y el volumen neto de granos.

5.2.3. Ensayos realizados con los testigos de acero

Con el propósito de obtener más resultados de la variación del volumen de arena debido a los cambios de porosidad, se ha utilizado la metodología de pesada con testigos de acero inoxidable, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4. Para conocer el tiempo de secado a utilizar en los experimentos, se ha expuesto uno de los testigos que contiene la mayor cantidad humedad en la arena (zona de bajamar: P2B1) a una temperatura de secado de 105ºC durante varios días, anotando cada día el peso del testigo (Figura 5.11). Cuando el peso se hizo constante, fue el indicativo de que se alcanzó la completa evaporación del agua (UNE 103-300, 1993 y ASTM D2216, 2010) siendo ése el número de horas mínimo para un correcto secado de las muestras. Según los experimentos realizados (Figura 5.12), el

tiempo óptimo de secado establecido para los testigos de acero inoxidable con arena húmeda de la playa victoria fue de 96 horas (4 días).

Fig. 5.11. Vista del secado (izd.) y pesado (der.) de los testigos de acero llenos de arena.

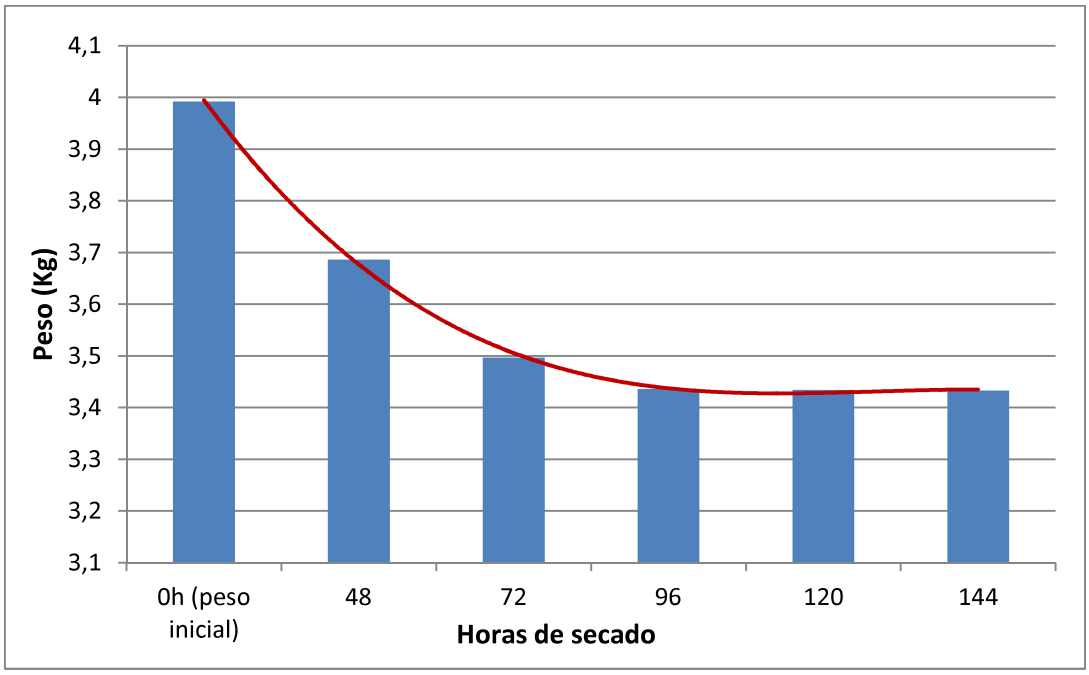


Fig. 5.12. Determinación del tiempo de secado de muestras según normas UNE 103-300 (1993) y ASTM D2216 (2010).

Tras someter todos los testigos al tiempo de secado óptimo de 96 horas, los resultados obtenidos con los testigos de acero inoxidable pueden consultarse en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Resultados volumétricos y de pesada obtenidos con los testigos cilíndricos de acero inoxidable.

Testigo	Peso testigo vacío (kg)	Peso testigo + arena húmeda (kg)	Peso testigo + arena seca (kg)	Peso neto arena seca (Kg)	Densidad aparente de la masa (Kg/m3)	Volumen granos (cm3)	Índice de granos (a)	Índice de poros (p)
P2Mberm 1	0,655	3,760	3,351	2,393	1524	903	0,58	0,42
P2Mberm 2	0,632	3,755	3,336	2,401	1529	906	0,58	0,42
P2Mberm 3	0,634	3,712	3,295	2,358	1502	890	0,57	0,43
P2M 1	0,639	3,908	3,332	2,390	1522	902	0,57	0,43
P2M 2	0,573	3,848	3,263	2,387	1520	901	0,57	0,43
P2M 3	0,632	3,937	3,342	2,407	1533	908	0,58	0,42
P2B 1	0,631	3,992	3,433	2,445	1557	923	0,59	0,41
P2B 2	0,550	3,849	3,290	2,437	1552	920	0,59	0,41
P2B 3	0,615	3,965	3,372	2,454	1563	926	0,59	0,41
Media	**0,607**	**3,917**	**3,339**	**2,420**	**1541**	**913**	**0,58**	**0,42**
D. Típica	**0,037**	**0,060**	**0,060**	**0,029**	**19**	**11**	**0,01**	**0,01**

Con los testigos de acero inoxidable resulta un índice medio de granos (a) y poros (p) de 0,58 y 0,42 respectivamente. Con esta metodología se ha conseguido alcanzar índices muy precisos y similares a los índices de referencia publicados por USACE (2002) (con una diferencia relativa media de un 3% y un 5%, respectivamente). Cabe destacar que la desviación respecto a la media es de tan sólo un 1%.

5.2.4. Ensayos realizados con el picnómetro de Helio

El método del picnómetro de Helio permite medir la densidad real de un sólido en forma de roca, granos o incluso polvo. En este caso se ha conseguido llevar al laboratorio una muestra inalterada directamente de la playa en un cilindro de acero inoxidable (Figura 5.13) para su secado y posterior análisis en el picnómetro según la metodología descrita.

El picnómetro ha realizado 15 repeticiones de medidas de la densidad real del sólido (Figura 5.14). Cada muestra se ha analizado por duplicado en el picnómetro (en total se han realizado 30 medidas sobre la arena catada en la playa del Río San Pedro, T.M. de Puerto Real). En la Tabla 5.9, se pueden consultar los resultados de densidad real obtenidos del análisis de arenas de la playa del Río San Pedro (T.M. de Puerto Real, Cádiz).

Fig. 5.13. Vista de la cata de arena de playa con las cubetas del picnómetro.

Fig. 5.14. Vista de la introducción de la cubeta llena de arena dentro del picnómetro.

Tabla 5.9. Resultados de la densidad real media obtenida con el método del picnómetro de Helio.

Cubeta pequeña (30 medidas)	**Cubeta grande (30 medidas)**
Volumen de arena = 3,166 cm^3	Volumen de arena = 58,492 cm^3
Peso neto arena = 8,67 gr	Peso neto arena = 65,30 gr
Densidad media = 2,7385 gr/cm^3	Densidad media = 1,1164 gr/cm^3
Desviación estándar = 0,0017	Desviación estándar = 0,00

A pesar que la cubeta grande alberga un mayor volumen de arena y podría entenderse como una mayor representatividad de la misma, la media de la densidad real (1,1164 gr/cm^3) se aleja bastante de la densidad media de las arenas costeras compuestas

mayoritariamente por sílice en forma de cuarzo (2,65 gr/cm^3) publicada por otros autores (USACE, 2002). En el caso de la medida realizada con la cubeta pequeña, la densidad real media es de 2,7385 gr/cm^3, más próxima al valor de referencia citado anteriormente. No obstante, para esta investigación utilizaremos el valor de referencia de 2,65 gr/cm^3 (2650 kg/m^3) con el fin de que las conclusiones de la presente Tesis Doctoral y la aplicabilidad de su metodología sea lo más generalizable posible.

5.2.5. Ensayos realizados con el densímetro nuclear

Con el objetivo de obtener resultados de densidad y porosidad a partir de los métodos nucleares, se acudió a la playa de Valdelagrana (T.M. Puerto de Santa María), que cuenta con un tamaño medio de grano de 0,24 mm (Tabla 5.10). El índice de poros o porosidad fue calculado a partir de la densidad seca medida en el terreno, según la formulación descrita en el capítulo 4. Concretamente se realizaron medidas de densidad en los mismos puntos donde se realizaron los ensayos con las probetas de plástico. En cada perfil se midió la densidad en la zona emergida de la playa (A), en la zona media del intermareal (M) y en la zona más próxima a la bajamar media (B). En uno de los perfiles (P1) se midió cada zona por triplicado.

Según la Tabla 5.10, la desviación típica cometida en cada estación de muestreo tras los análisis por triplicado tiene un rango de variabilidad máximo de la densidad entre 11 y 26 kg/m^3,mientras que para el índice de poros, la desviación típica es prácticamente despreciable.

Tabla 5.10. Resultados de los registros de densidad obtenidos con el densímetro nuclear.

PUNTO	DENSIDAD (kg/m3)	ÍNDICE POROS
P1AI	1557	0,41
P1AII	1575	0,41
P1AIII	1609	0,39
P1MI	1698	0,36
P1MII	1680	0,37
P1MIII	1699	0,36
P1BI	1701	0,36
P1BII	1691	0,36
P1BIII	1724	0,35
P2A	1589	0,40
P2M	1681	0,37
P2B	1676	0,37
Media P1A	1580	0,40
Media P1M	1692	0,36
Media P1B	1705	0,36
D. Típica P1A	26	0,01
D. Típica P1M	11	0,00
D. Típica P1B	17	0,01

5.2.6. Comparación de resultados y análisis de los errores cometidos

En cuanto a la comparación de resultados, en este apartado se presentan los resultados obtenidos que puedan ser directamente comparables entre sí, es decir, que se hayan realizado al menos dos métodos de medidas de densidad en el mismo sitio, al mismo tiempo y en las mismas condiciones. Estas metodologías han sido las probetas de plástico, los testigos cilíndricos de acero inoxidable y el densímetro nuclear. La finalidad es tratar de determinar cuál de ellas puede considerarse como la más precisa, práctica y eficiente para realizar las campañas de estudio de la porosidad del sedimento a diferentes plazos tras una regeneración de playa. En la Tabla 5.11 podemos comparar los resultados del índice de porosidad calculados en la playa de Valdelagrana mediante el método de las probetas de plástico frente al método del densímetro nuclear.

Tabla 5.11. Comparación de los resultados del índice de poros obtenidos con el método de las probetas frente al método del densímetro nuclear en la playa de Valdelagrana

PUNTO	Probetas	Densímetro
P1AI	0,39	0,41
P1AII	0,32	0,41
P1AIII	0,34	0,39
P1MI	0,51	0,36
P1MII	0,36	0,37
P1MIII	0,44	0,36
P1BI	0,40	0,36
P1BII	0,40	0,36
P1BIII	0,31	0,35
P2A	0,30	0,40
P2M	0,41	0,37
P2B	0,34	0,37
Media P1A	0,35	0,40
Media P1M	0,43	0,36
Media P1B	0,37	0,36
D. Típica P1A	0,04	0,01
D. Típica P1M	0,08	0,00
D. Típica P1B	0,05	0,01

El método de las probetas muestra un índice de poros diferente y con una mayor variabilidad al obtenido con el método del densímetro. Mientras que las probetas muestran índices entre 0,3 y 0,51 (con una desviación típica de hasta un 8%), el densímetro muestra índices entre 0,35 y 0,41 (con una desviación típica de sólo un 1%). Por consiguiente, debido a la mayor maniobrabilidad, eficiencia y precisión en los resultados, el método del densímetro nuclear se considera más idóneo en la toma de datos de densidad y cálculo de porosidad según la metodología descrita.

En el caso del uso comparativo entre la metodología de los testigos de acero inoxidable y el densímetro nuclear, en la Tabla 5.12 se pueden contrastar los resultados de porosidad obtenidos en un perfil transversal de la playa Victoria. Dada la experiencia adquirida en los ensayos anteriores, para un estudio más exhaustivo, los ensayos se han realizado por triplicado en las zonas húmedas del perfil transversal (donde el contenido de

agua es mayor): en la zona alta del intermareal (Mberm), la zona media del intermareal (M) y en la zona más próxima a la bajamar media (B).

Tabla 5.12. Comparación de los resultados del índice de poros obtenidos con el método de los testigos de acero frente al método del densímetro nuclear en el perfil 2 de la playa Victoria

PUNTO	Testigos acero	Densímetro
P2Mberm 1	0,42	0,35
P2Mberm 2	0,42	0,36
P2Mberm 3	0,43	0,36
P2M 1	0,43	0,37
P2M 2	0,43	0,37
P2M 3	0,42	0,37
P2B 1	0,41	0,38
P2B 2	0,41	0,37
P2B 3	0,41	0,37
P1Mberm	0,43	0,38
P1M	0,43	0,38
P1B	0,42	0,37
Media P2Mberm	0,42	0,36
Media P2M	0,43	0,37
Media P2B	0,41	0,37
D. Típica P2Mberm	0,01	0,00
D. Típica P2M	0,01	0,00
D. Típica P2B	0,00	0,00

En la comparación del método de los testigos de acero con el densímetro nuclear, como con las probetas, se siguen observando diferencias importantes entre los índices de poros, con una diferencia relativa media del 14,3%. En este caso, ambos métodos ofrecen una desviación típica prácticamente despreciable en las medidas repetidas por triplicado.

5.2.7. Elección de la mejor técnica disponible

Cualquiera de las técnicas utilizadas en esta investigación podrían conducir a estimar la porosidad del medio estudiado en un mayor o menor porcentaje de fiabilidad. No obstante, tras los estudios de precisión y comparación entre las diferentes metodologías

(probetas, testigos de acero y densímetro), se ha obtenido como las más precisas (menor desviación típica) la de los testigos de acero y la del densímetro nuclear. No obstante, tras los resultados obtenidos se ha decidido por el método del densímetro nuclear para la toma de datos por los siguientes motivos:

- ✓ Su metodología cumple con lo estipulado en la norma estandarizada para el cálculo de la densidad de suelos (ASTM D6938, 2010).
- ✓ Permite la obtención inmediata in situ de datos de densidad y humedad sin tener que recurrir a métodos de intervención física, tales como la extracción de testigos. El densímetro supone una técnica sencilla, rápida y completa frente a la manipulación, transporte y los 4 días de secado a lo que tienen que someterse los testigos de acero.
- ✓ Requiere una menor intervención del operario de modo que pueda alterar la muestra en su acopio, traslado y posterior análisis en laboratorio. A mayor manipulación, mayor riesgo de alteración.
- ✓ Se trata de una técnica no destructiva del lecho costero, pudiéndose repetir reiterativamente la misma medida en el mismo punto.
- ✓ Permite estimar el porcentaje de compactación a través de los ensayos Proctor modificado realizados en la misma arena en el laboratorio.
- ✓ Mejor maniobrabilidad y comodidad.

No obstante, el densímetro nuclear tiene una serie de debilidades que hay que analizar para decidir cuándo optar en su momento por la técnica de los testigos:

- Elevado coste de adquisición, mantenimiento o alquiler del equipo.
- Laboratorio y maquinaria especializada.

5.3. Resultados de los ensayos Proctor modificado.

Para determinar los comportamientos y diferencias de densidad entre las arenas nativas y de préstamo bajo las mismas condiciones energéticas de compactación (ASTM D1557, 2012 y UNE 103-501, 1994), en la Tabla 5.13 se presentan la densidad máxima y humedad óptima alcanzadas a través del ensayo Proctor modificado para las playas estudiadas y las arenas de sus respectivas zonas de préstamo.

Tabla 5.13. Densidad máxima y humedad óptima tras ensayo Proctor modificado en las arenas nativas de las playas Victoria, Camposoto, Atunara, Ballena y Fontanilla, y en las arenas de préstamo utilizadas.

	Arena nativa		Arena de préstamo		Diferencias relativas	
	Densidad (kg/m3)	Humedad (%)	Densidad (kg/m3)	Humedad (%)	Densidad (%)	Humedad (%)
Victoria	1730	12,8	1710	11,3	1,2	11,7
Camposoto	1830	13,9	1770	14,4	3,3	3,5
La Atunara	2020	13,5	1850	12,8	8,4	5,2
La Ballena	1710	9,4	1630	10,3	4,7	9,6
La Fontanilla	1870	6,3	1580	6,4	15,5	1,6

En general, la máxima densidad alcanzada en la arena nativa de la playa fue siempre mayor que la arena de préstamo, con diferencias relativas de +1,2%, +3,3%, +8,4%, +4,7% y +15,5% en las playas Victoria, Camposoto, La Atunara, La Ballena y La Fontanilla, respectivamente. Estos valores indican que la arena nativa de cada playa puede alcanzar valores de compactación mayores que la arena de préstamo utilizada para su regeneración. Asimismo, los valores obtenidos tras los ensayos realizados en la arena de todas las playas en diferentes plazos, muestran valores muy coherentes respecto a la densidad medida in situ por el densímetro nuclear. La máxima densidad alcanzada con el ensayo se ha logrado tras una compactación en un entorno húmedo óptimo. No obstante, es posible apreciar cómo a veces, el porcentaje de compactación natural de la arena medida in situ es superior (>100%) al obtenido con el ensayo Proctor modificado (ANEXO II).

5.4. Análisis de la precisión del densímetro.

5.4.1. Variabilidad debida a la heterogeneidad del terreno

Se han realizado una serie de ensayos en dos zonas diferenciadas del perfil transversal de la playa Victoria: en la parte seca de la playa (P2A) y en el intermareal (P2M). Ambas zonas cuentan con diferente porcentaje de humedad (Tabla 5.14).

Tabla 5.14. Ensayos de la variabilidad de la densidad, humedad y porosidad debido a la heterogeneidad del terreno en 1 m² en la zona seca (P2A) y en la zona intermareal (P2M) de la playa Victoria.

	P2A			P2M		
Zonas	Densidad (Kg/m³)	Porosidad (%)	Humedad (%)	Densidad (Kg/m³)	Porosidad (%)	Humedad (%)
Esquina sup. Izd.	1722	35,0	3,7	1644	38,0	18,2
Esquina sup. Der.	1709	35,5	3,8	1650	37,7	18,4
Esquina inf. Izd.	1788	32,5	4,1	1646	37,9	19,0
Esquina inf. Der.	1689	36,3	4,0	1640	38,1	19,7
Centro	1738	34,4	3,5	1656	37,5	18,5
Media	1729,2	34,7	3,8	1647,2	37,8	18,7
Desv. Estándar	37,4	1,4	0,2	6,1	0,2	0,6
Máx. Dif. Abs.	49,0	3,7	0,6	16,0	0,6	1,5
Máx. Dif. Rel. (%)	2,8	10,3	14,6	0,9	1,6	7,6

Según los datos expuestos en la Tabla 5.14, la variabilidad en la medición de la densidad debido a la heterogeneidad del terreno natural cuenta con una desviación estándar del 1,4% en el P2A y del 0,2% en el P2M. No obstante, se han encontrado diferencias relativas máximas de hasta del 10,3% en la zona emergida no alcanzada por la marea (P2A) y de tan sólo del 1,6% en la zona intermareal (P2M).

En cuanto al estudio de la precisión del densímetro en función de la profundidad del ensayo, en la Tabla 5.15 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5.15. Datos de densidad, humedad y porosidad obtenidos en un estrato vertical a 0,25 y 0,5 m de profundidad en dos posiciones. y a una distancia horizontal de 0,3 m.

Distancia (m)	Densidad (kg/m3)	Humedad (%)	Porosidad (%)
0,3 horizontal	1690	4,6	36,2
0,25 vertical	1577	11,7	40,5
0,50 vertical 0º	1487	11,5	43,9
0,50 vertical 90º	1493	11,4	43,7

Como puede observarse en la Tabla 5.15, la humedad es mayor a partir de 0,25 cm de profundidad, pasando de una humedad de 4,6% registrada en superficie a 11,7% a 0,25 m. En cuanto a la densidad seca, ésta disminuye a medida que se profundiza, pasando de

1690 kg/m^3 en superficie a 1577 kg/m^3 (diferencia relativa de -6,7%) a 0,25 m de profundidad y hasta 1487 kg/m^3 (diferencia relativa de -12%) a 0,50 m de profundidad. En base a esta tendencia de los valores de densidad seca, se ha detectado un ascenso progresivo de la porosidad en la columna de sedimento, pasando de un 36% a un 44% en apenas medio metro.

En cuanto a la precisión del densímetro debido a la situación de la base del aparato, este experimento ha mostrado que su variabilidad es prácticamente nula, con una diferencia absoluta y relativa de la porosidad de 0,2% y 0,0%, respectivamente. En este caso, el sentido de colocación de la base del densímetro nuclear, parece no haber tenido efecto en la precisión de la medida.

5.4.2. Variabilidad debida a la repetitividad del aparato

En la Tabla 5.16, se presentan los resultados obtenidos tras someter al densímetro a una prueba de precisión midiendo consecutivamente el mismo punto varias veces. En este caso se han escogido del perfil 2 de la playa Victoria, la zona emergida (P2A) e intermareal (P2M).

Tabla 5.16. Ensayos de la repetitividad del densímetro nuclear midiendo el mismo punto consecutivamente en la zona emergida (P2A) y en la zona intermareal (P2M) de la playa Victoria.

	P2A			P2M		
Ensayos	Densidad (Kg/m^3)	Porosidad (%)	Humedad (%)	Densidad (Kg/m^3)	Porosidad (%)	Humedad (%)
I	1708	35,5	3,6	1653	37,6	18,4
II	1706	35,6	3,4	1665	37,2	18,0
III	1720	35,1	3,1	1647	37,8	18,7
IV	1728	34,8	3,4	1643	38,0	19,0
V	1715	35,3	3,4	1650	37,7	18,8
Media	1715,4	35,3	3,4	1651,6	37,7	18,6
Desv. Estándar	8,9	0,3	0,2	8,3	0,3	0,4
Máx. Dif. Abs.	22,0	0,8	0,5	22,0	0,8	1,0
Máx. Dif. Rel. (%)	1,2	2,1	13,9	1,3	2,2	5,2

En el caso de los ensayos realizados repetitivamente en la misma arena (zona emergida e intermareal), los resultados muestran una diferencia relativa máxima en la medida de densidad y porosidad en torno al 1 y al 2% respectivamente en ambas zonas.

Asimismo, las máximas diferencias absolutas en la densidad se han situado en torno a 22 kg/m^3, en lugar de los 3,4 kg/m^3 calculados por el fabricante del aparato bajo un entorno controlado (Troxler et al., 2001).

5.4.3. Variabilidad debida al tiempo de medición

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras realizar 2 ciclos de medidas de la densidad en el mismo punto de la playa Victoria (P2A): un primer ciclo de 60 segundos y otro ciclo de 15 segundos (Tabla 5.17).

Tabla 5.17. Ensayos de la repetitividad del densímetro nuclear midiendo el mismo punto consecutivamente en la zona seca (P2A) y en la zona intermareal (P2M) de la playa Victoria.

	P2A (60 seg.)			P2A (15 seg.)		
Ensayos	Densidad (Kg/m^3)	Porosidad (%)	Humedad (%)	Densidad (Kg/m^3)	Porosidad (%)	Humedad (%)
I	1708	35,5	3,6	1719	35,1	3,5
II	1706	35,6	3,4	1741	34,3	3,1
III	1720	35,1	3,1	1722	35,0	3,3
IV	1728	34,8	3,4	1711	35,4	3,5
V	1715	35,3	3,4	1727	34,8	3,0
Media	1715,4	35,3	3,4	1724,0	35,0	3,3
Desv. Estándar	8,9	0,3	0,2	11,1	0,4	0,2
Máx. Dif. Abs.	22,0	0,8	0,5	30,0	1,1	0,5
Máx. Dif. Rel. (%)	1,2	2,1	13,9	1,7	3,2	14,3

Según los resultados presentados en la Tabla 5.17, todas las mediciones de densidad y porosidad realizadas durante 15 segundos presentan una desviación estándar y diferencias absolutas y relativas ligeramente superiores que para el intervalo de 60 segundos. No obstante, las diferencias relativas de los valores medios de la densidad y la porosidad fueron de 0,5% y 0,9%, respectivamente para ambos intervalos de tiempo. A pesar de que todas las medidas a lo largo de esta Tesis se realizaron durante un intervalo de 60 segundos (según norma ASTM D6938 (2010), cualquier descuido del operario al programar un menor intervalo de tiempo en el densímetro, no hubiera supuesto un error significativo.

5.4.4. Variabilidad debida al efecto de la carrera de marea

En la Tabla 5.18, se presentan los resultados horarios obtenidos en un perfil transversal de la playa Victoria durante una bajamar. Con este experimento se ha establecido la variación de la porosidad con la vaciante de marea y por tanto, con el nivel freático del suelo.

Tabla 5.18. Resultados de la densidad, humedad y porosidad de la arena del perfil 2 de la playa Victoria durante una bajamar.

	P2Mberm			P2M			P2B		
Hora	Densidad (kg/m3)	Humedad (%)	Porosidad (%)	Densidad (kg/m3)	Humedad (%)	Porosidad (%)	Densidad (kg/m3)	Humedad (%)	Porosidad (%)
18:30	1631	16,9	38,5	-	-	-	-	-	-
19:30	1696	11	36,0	-	-	-	-	-	-
20:30	1704	7,4	35,7	1642	22,6	38,0	-	-	-
21:30	1710	5,9	35,5	1657	21,5	37,5	-	-	-
22:30	1705	5,7	35,7	1669	21,1	37,0	1651	20,9	37,7
23:30	1706	5,7	35,6	1670	20,7	37,0	1663	20,6	37,2

Se observa un aumento progresivo de la densidad aparente de la arena hasta su estabilización en las 3 estaciones, y por tanto, una disminución de la porosidad. Paralelamente, y como era de esperar, se observa una disminución gradual de la humedad de la arena a medida que baja la marea.

En la Figura 5.15 puede consultarse por horas la disminución progresiva de la porosidad en cada estación acorde con la vaciante hasta su estabilización a partir de la cuarta hora. Esto parece indicar que los valores de porosidad son más estables cuando la marea, y por tanto el nivel freático del agua, ha bajado completamente. Estos resultados indican una mayor fiabilidad y precisión de las medidas tomadas durante la bajamar en todas las campañas realizadas.

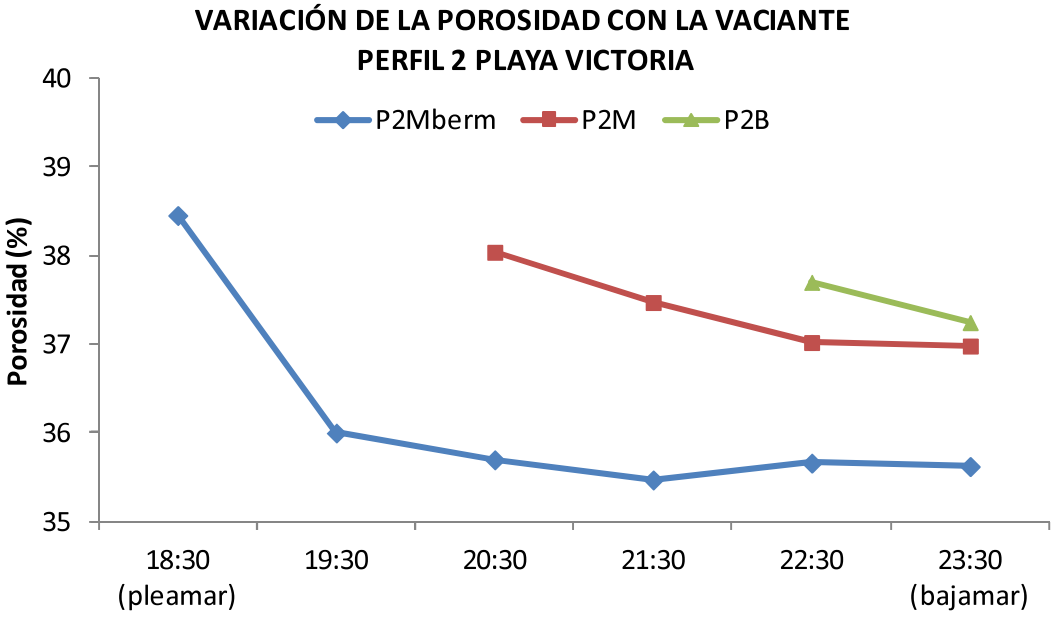


Fig. 5.15. Variación horaria de la porosidad con la vaciante de marea en las estaciones Mberm, M y B del perfil 2 de la playa Victoria.

El error máximo relativo calculado en función de la altura de la marea (nivel freático) es del 4,4% en el punto P2Mberm. Con el fin de no arrastrar con este error en la medida de la densidad de la arena, todas las campañas de medidas se realizaron durante la máxima bajamar, con altos coeficientes de marea en torno a 1,00. De esta manera también se ha facilitado una mayor distancia transversal del perfil, así como la toma de muestras de arena.

5.5. Análisis de datos meteorológicos y marítimos.

En la Figura 5.16, se muestran las series históricas del oleaje recogido en la boya 1320 costera de Cádiz para la vertiente atlántica durante los años 2010 y 2011. En este periodo de toma de datos (19/08/2010 al 12/04/2013), se distinguen 3 temporales importantes con $H_s \geq 4$ m: uno en diciembre de 2010, otro en febrero de 2011 y otro en octubre de 2011. En la Figura 5.17, se muestran las series temporales de altura de oleaje para el bienio 2012-2013, con un temporal con $H_s = 5$ m a principios de 2013.

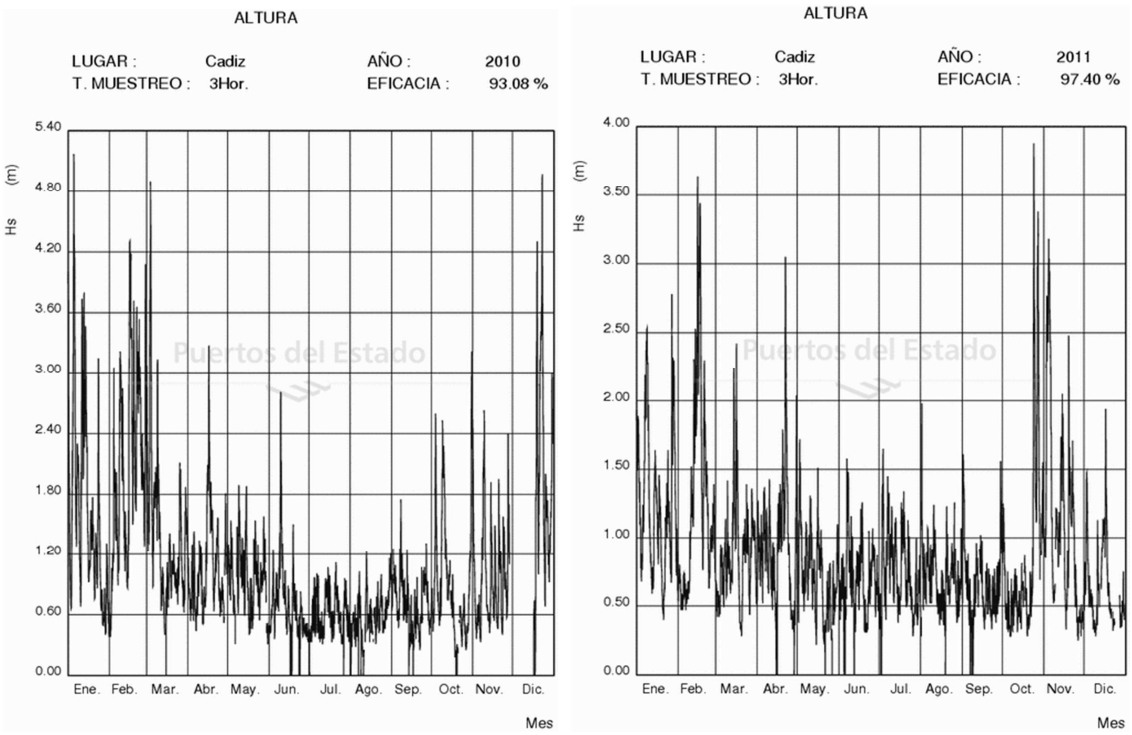


Fig. 5.16. Series diarias de altura de oleaje en la boya 1320 costera de Cádiz para los años 2010 (izd.) y 2011 (der.). (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

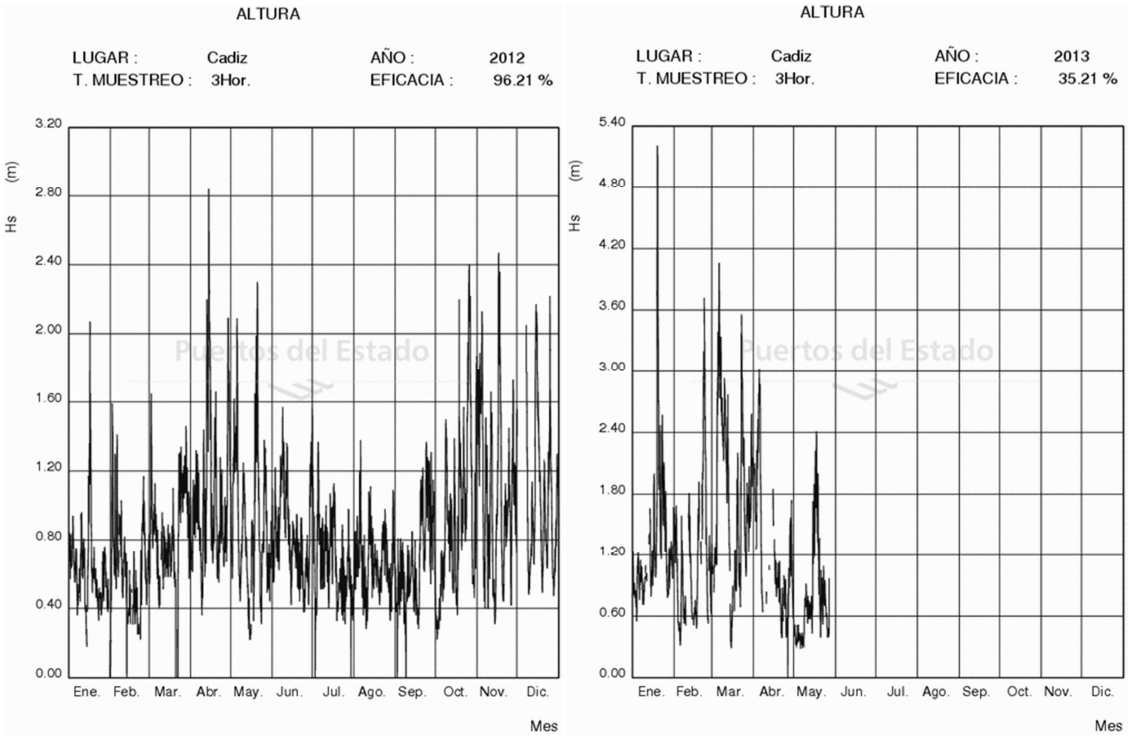


Fig. 5.17. Series diarias de altura de oleaje en la boya 1320 costera de Cádiz para los años 2012 (izd.) y 2013 (der.). (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

Para el caso de la vertiente mediterránea (Playa Atunara) los datos de altura de ola significante para el periodo 2011 mostraron alturas de ola de 4 metros a principios de año (Figura 5.18).

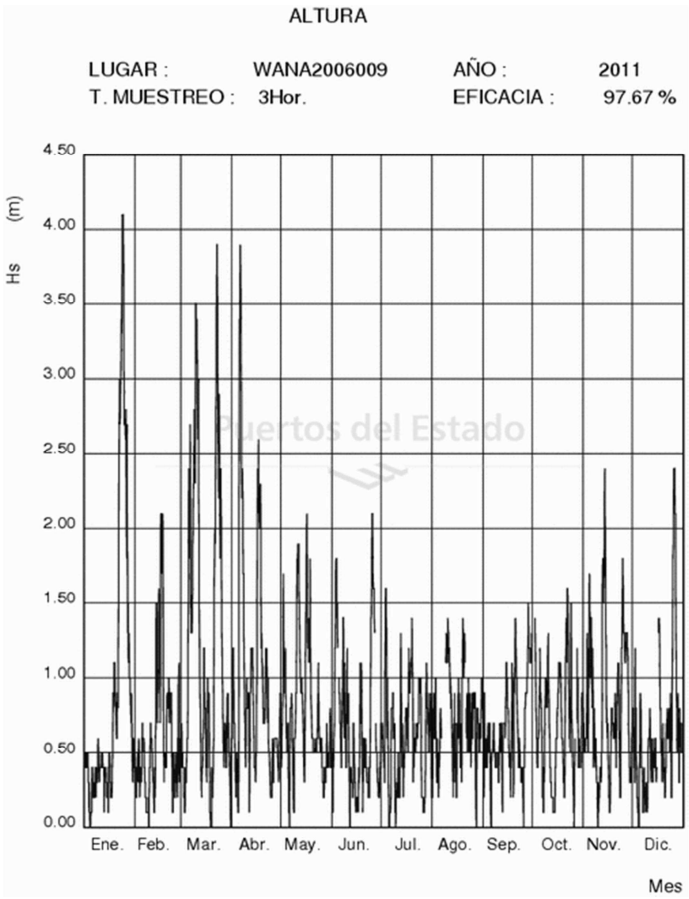


Fig. 5.18. Altura significante de oleaje registrada en el punto WANA2006009, situado en la parte mediterránea para todo el año 2011.

En el ANEXO III, se han representado los valores medios de viento, temperatura y precipitación para los años de estudio que abarca el desarrollo de las campañas de campo de esta Tesis Doctoral, es decir, el cuatrienio 2010-2013.

5.6. Variabilidad espacio-temporal de la densidad y porosidad de la arena.

En el presente apartado se muestran y analizan los principales resultados obtenidos de densidad y porosidad para cada una de las playas estudiadas. En un principio, se ha analizado la evolución mostrada por la densidad aparente a lo largo del tiempo con el fin de poder compararla posteriormente con la evolución de la porosidad teórica, calculada a partir de dicha densidad y del contenido de humedad, según la formulación descrita en el Capítulo 4.

Todos los resultados obtenidos en las diferentes playas correspondientes a los valores de densidad, humedad y profundidad in situ, porosidad calculada, máxima compresión, máxima densidad, humedad óptima y mínima porosidad teórica (según ensayo Proctor modificado), así como un apartado de observaciones, se pueden consultar en el ANEXO II .

5.6.1. Playa Victoria

Para la regeneración de la playa Victoria (D_{50} = 0,24 mm), se utilizó una arena con un tamaño medio de aproximadamente 0,32 mm (Tabla 5.1), extraída de la zona de préstamo (Placer de Meca) mediante una draga de succión hidráulica.

Como estudio previo, en la Figura 5.19, se representa la variabilidad de la **densidad** aparente registrada in situ con el densímetro nuclear en el perfil 1 y 2 (P1 y P2) de la playa Victoria, para cada estación (A: emergida; M: intermareal; Mberm: berma del intermareal; B: junto a la bajamar) y para cada campaña realizada. En dicha figura, se puede observar la variabilidad de la densidad en función del vertido de arena de préstamo y los diferentes agentes que intervienen en su evolución: el oleaje, la marea, los temporales, la lluvia, etc.

En líneas generales se puede observar cómo la densidad de la arena disminuye entre un 3 y un 6% aproximadamente en las estaciones recién regeneradas (P1M, P1B, P2M y P2B), mientras que la densidad de la arena de la zona emergida del P1A permanece estable al no haber sido regenerado en ese momento. El P2A muestra un aumento de la densidad anterior a la regeneración sin causa aparente. El paso de maquinaria pesada a lo largo de dicha estación y el efecto de la lluvia podría haber compactado la arena por motivos externos y no controlados en esta investigación, circunstancia que sólo ocurrió en esta ocasión. No obstante, justo tras la regeneración del P2A, se confirma una disminución de la densidad del 4% tras el vertido masivo de arena sobre el punto, mientras que en el punto P1A disminuyó tras la regeneración casi un 10%, de 1680 a 1530 kg/m^3. Estas disminuciones tras el vertido de la arena de préstamo se reflejaron también en el ensayo Proctor modificado, donde las densidades máximas alcanzadas decrecieron de 1730 kg/m^3 a 1710 y 1660 kg/m^3 en el P1 y P2, respectivamente.

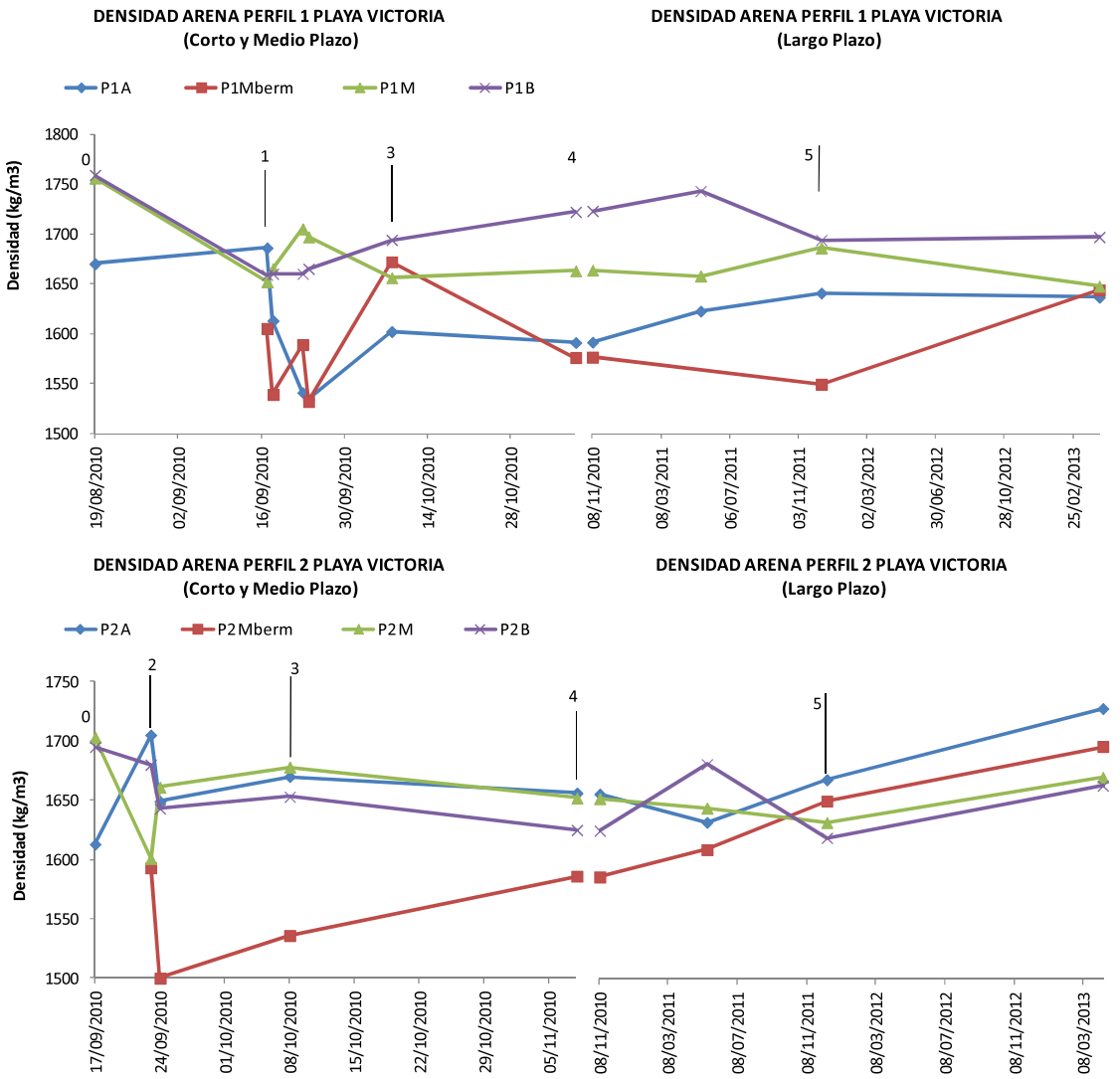


Fig. 5.19. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los 2 perfiles de la playa Victoria a corto, medio y largo plazo (D_{50}=0,24 mm; carrera marea=3,6 m). Notaciones: 0) Estado nativo; 1) Perfil 1 (P1) regenerado y efecto de la lluvia; 2) Perfil 2 (P2) regenerado; 3) paso de mareas vivas equinocciales (Coeficiente marea=1,12); 4) un mes tras las mareas vivas; 5) paso de temporales (Hs=4 m).

Tras el efecto de las mareas diarias y especialmente tras el efecto de las mareas vivas equinocciales (mayor rango de marea del año, con un coeficiente de 1,12) que coincidieron en esa época, la densidad comenzó el proceso de recuperación paulatina de su valor nativo en todos los puntos afectados por la carrera de marea. A diferencia del resto de puntos, la carrera de marea no alcanzaba siempre la zona seca de la playa, por lo que la densidad de dichas estaciones han mostrado un comportamiento relativamente retardado, respecto al resto de puntos, a la hora de recuperar su densidad original. A partir de las mareas vivas equinocciales, con el paso del tiempo a largo plazo se puede verificar una clara tendencia a recuperar los valores originales de densidad en ambos perfiles.

La tendencia creciente de la densidad no se ve truncada de forma relevante por el efecto de los temporales sucedidos en diciembre de 2010, febrero de 2011 y en octubre de 2011, aunque la disminución de la densidad de las estaciones más sometidas al oleaje (P1B y P2B) a finales de 2011 podría estar directamente relacionada a dichos temporales. No obstante, a pesar de los temporales acontecidos en el año 2012 y especialmente a principios del 2013 (Figura 5.17), la tendencia general de la densidad ha sido creciente.

Estas variaciones de la densidad tras la regeneración y su posterior recuperación paulatina, provocada especialmente por el efecto de las mareas y el oleaje constructivo tipo swell, parece validar la hipótesis de partida, aunque es necesario estudiar el comportamiento y evolución de la porosidad, puesto que está afectada directamente por el contenido de humedad de la propia arena.

Una vez analizada la densidad de la arena de la playa Victoria a lo largo del tiempo tras su regeneración, procederemos a analizar detenidamente la variabilidad de la **porosidad** de la arena, calculada a partir de la densidad aparente y humedad registradas in situ con el densímetro. Se ha modificado el eje de abscisas con el fin de poder cuantificar con mayor claridad el tiempo transcurrido entre los diferentes eventos a estudiar. A partir de la fecha de regeneración de los perfiles 1 y 2 de la playa Victoria (17 y el 23 de septiembre de 2010 respectivamente) se han estudiado el efecto de factores como el vertido de arena, el efecto de la lluvia, del paso de la primera marea, de las mareas vivas equinocciales, el paso de varios temporales, del oleaje constructivo, etc.

Para el caso de los dos perfiles transversales de la playa Victoria: Perfil 1y Perfil 2, en la Figura 5.20 se muestra la variación de la porosidad de cada estación a lo largo del tiempo. También se muestran las diferencias relativas en sendas curvas de porosidad relativa acumulada para ambos perfiles.

La porosidad natural de la arena nativa de los perfiles transversales de la playa Victoria, presenta un rango de variación entre un 34 y un 39% (anterior a la regeneración). Inmediatamente después del vertido de arena, la porosidad permaneció prácticamente constante en la zona emergida de ambos perfiles, mientras que se incrementó drásticamente en las estaciones P1M (+11,6%), P1B (+11,2%) y P2M (+10,8%). Este aumento de la porosidad registrado tras el vertido de arena está acompañado de un aumento progresivo del tamaño medio de grano (Figura 5.1) debido a la mayor granulometría de la arena de préstamo. Asimismo, cabe destacar la alta variabilidad de la porosidad registrada en el P2 en el corto plazo justo tras el vertido de arena, con un rango máximo de variación entre un

35 y un 40%. Después del efecto del primer ciclo de marea (12 horas tras el vertido), la porosidad continuó su aumento ligeramente en las zonas emergidas que no fueron alcanzadas por la marea dada la topografía adquirida tras el vertido de arena. Concretamente en la zona seca de la playa y en los nuevos puntos P1Mberm (+6,3%) y P2Mberm (+8,8%). Por el contrario, en las zonas barridas por la primera marea, la porosidad permaneció prácticamente constante en las zonas más próximas a la bajamar (P1B y P2B) y comenzó a decrecer (-5,7%) en el intermareal del punto P2M. Una semana después del vertido, la porosidad aumentó progresivamente (+7,6%) en la estación P1A (aún no afectada por la marea), pero comenzó a decrecer ligeramente en zonas mareales como en el P1M (-3,2%), mientras que en el resto de zonas (P1Mberm y P1B) no hubo cambios importantes.

A medio plazo, el efecto de las mareas vivas equinocciales acontecidas entre 15 y 21 días después de la regeneración y que afectaban a todo el perfil transversal, provocó un descenso generalizado de la porosidad en todas las estaciones, con diferencias relativas importantes en P1A (-6,1%), P1Mberm (-12,5%), P2Mberm (-3,1%), así como descensos en el resto de puntos por debajo del -3% de variación. Estas variaciones por debajo del 3% no se consideran significantes debido a que se encuentran cerca del rango de precisión del aparato.

A medio y largo plazo, todos los valores de porosidad mostraron una tendencia decreciente hacia la recuperación de los valores de la arena natural (nativa) tras aproximadamente 240 días (8 meses) después de la regeneración de la playa. No obstante, al final del periodo de estudio y tras los últimos temporales, se aprecia un aumento puntual de +5,4% y +6,4% en la porosidad de las estaciones más expuestas a la acción marina (P1B y P2B respectivamente).

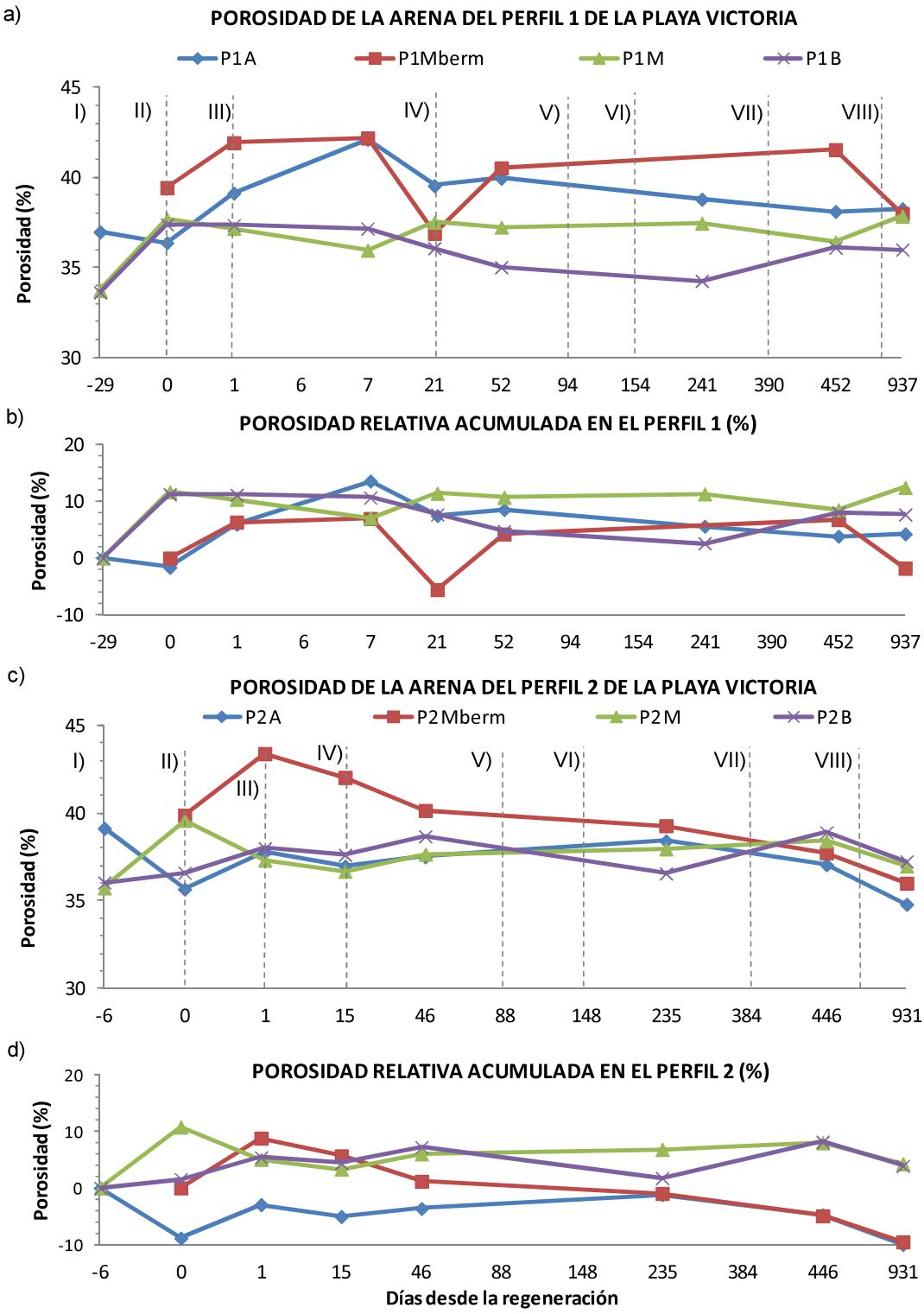


Fig. 5.20. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 2 perfiles de la playa Victoria (D50 = 0,24 mm; carrera de marea = 3,6 m). a): Variabilidad de la porosidad en P1; b) Porosidad relativa acumulada en P1; c) Variabilidad de la porosidad en P2; d) Porosidad relativa acumulada en P2. Notaciones: I) Porosidad de la arena nativa; II) inmediatamente después de la regeneración del perfil; III) tras 12h; IV) tras el efecto de las mareas equinocciales; V) tras un temporal con Hs = 5 m; VI) tras un temporal con Hs = 4 m; VII) tras un temporal con Hs = 4 m; VIII) tras un temporal con Hs = 5 m.

5.6.2. Playa Camposoto

La playa de Camposoto es una playa natural, con un sistema dunar y una marisma asociada a la playa. A lo largo de dicha playa, se estudiaron 2 perfiles transversales (P1 y P2), coincidiendo con la zona que iba a ser regenerada con arenas medias procedentes del Placer de Meca (Tabla 5.1). En cada perfil se establecieron 3 estaciones de control: zona emergida de la playa (A), la zona media del intermareal (M) y la zona más próxima a la bajamar media (B). La playa de Camposoto está relativamente cercana a la playa Victoria, por lo que los datos de clima marítimo son los mismos que en el caso de ésta última, recopilados de la página web de Puertos de Estado (2013), en la boya 1320 costera de Cádiz. Para todo el intervalo de estudio (25/08/2010 al 13/12/2011), se distinguen los mismos temporales importantes que en la Victoria, con $H_s \geq 4$ m: uno en diciembre de 2010, otro en febrero de 2011 y otro en octubre de 2011.

En la Figura 5.21, se ha representado la variación de la **densidad** en distintos plazos, registrándose cada evento estudiado: vertido de arena, mareas, temporales, etc.

El rango de la densidad de la arena nativa de la playa de Camposoto abarca desde 1700 a 1860 kg/m^3 aproximadamente. Concretamente, tras la regeneración de los perfiles se observa una brusca disminución de los valores de densidad de todas las estaciones, respecto a su valor original: P1A (-6,3%), P1M (-8,9%), P1B (-2,1%), P2A (-14,1%), P2M (-4,3%) y P2B (-5,5%). Con el paso de las primeras mareas y las mareas vivas equinocciales, no solo se frena esta tendencia decreciente, sino que además, los valores de densidad comienzan a recuperarse muy ligeramente apenas un mes después del vertido de arena. Debido exclusivamente al efecto del oleaje constructivo de verano (tipo swell) y al efecto de las mareas, la recuperación de la densidad en ambos perfiles se sitúa en torno al 3 y al 5% en todas las estaciones excepto en P1M y P2M donde existe una recuperación de la densidad más paulatina, tardando del orden de 1 mes más en cambiar la tendencia decreciente. No obstante, a medio y largo plazo (meses-año), se observa una recuperación moderada de la densidad en todo el perfil 1, mientras que en el perfil 2, la recuperación es notable en todas las estaciones, donde la densidad recobra completamente su valor original aproximadamente 8 meses tras el vertido de la arena. Este hecho es especialmente notable en la zona intermareal (P2M), con una disminución de la densidad que cambia de 1757 a 1588 kg/m^3 (-9,6%) tras el vertido de arena y con una recuperación 8 meses después, alcanzando los 1767 kg/m^3 (+10,1%). Posteriormente, la densidad se estandariza en torno a los valores originales.

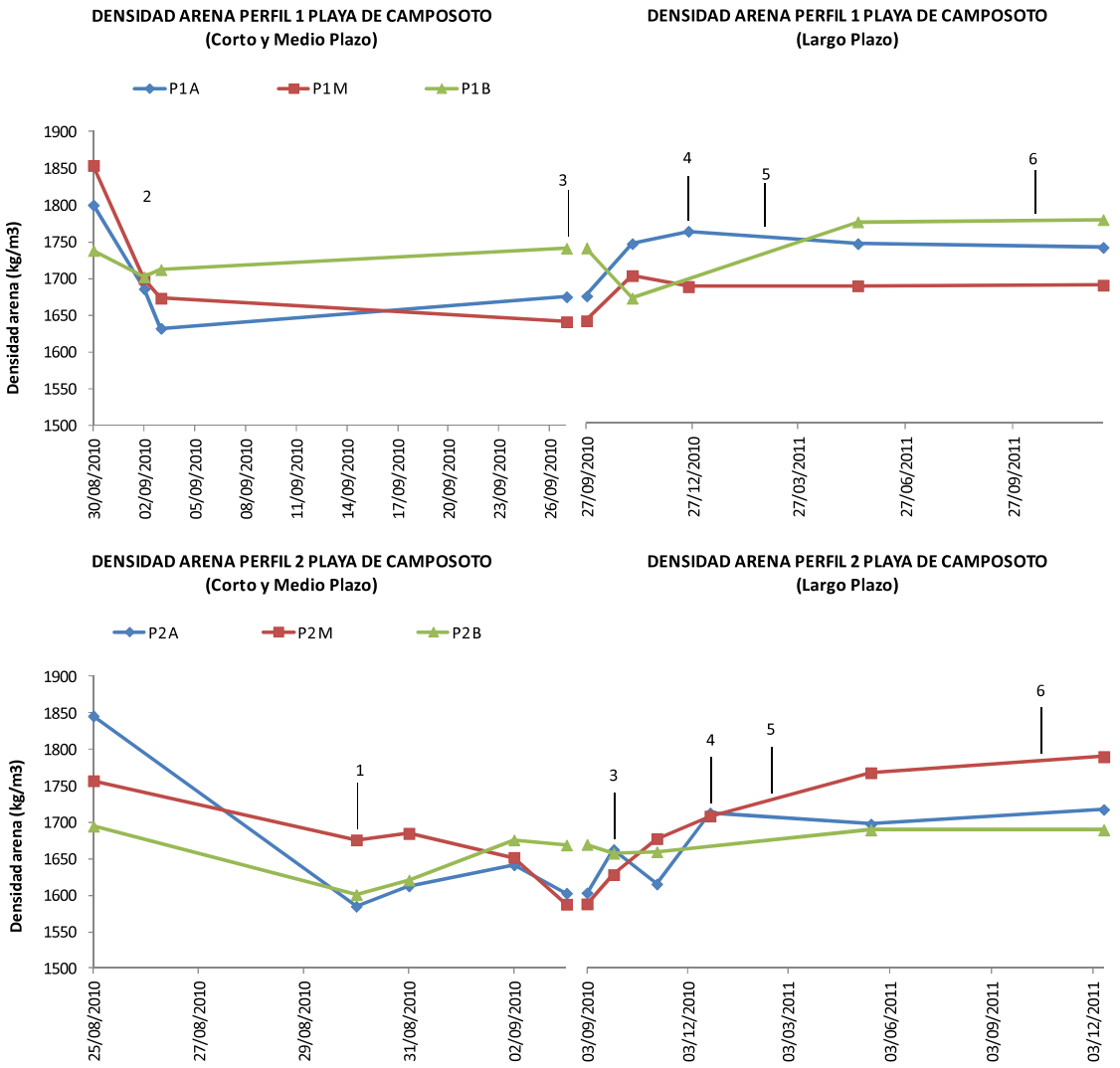


Fig. 5.21. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los 2 perfiles de la playa de Camposoto a corto (horas), medio (días-meses) y largo plazo (años). Notaciones: 1: P2 regenerado; 2: P1 regenerado; 3: paso mareas vivas; 4, 5 y 6: paso de temporales (Hs=4 m).

Asimismo, cabe resaltar que a diferencia de la playa Victoria, en la playa de Camposoto no se ha podido correlacionar claramente el efecto de los temporales sobre la tendencia de los valores de densidad. En este caso, ninguno de los tres temporales acontecidos parece haber alterado la tendencia de recuperación de los valores de densidad.

En cuanto a la variabilidad de la **porosidad** de la arena en la playa de Camposoto, en la Figura 5.22 se puede consultar gráficamente la evolución de la misma en ambos perfiles y para todas las estaciones. En cada perfil se han marcado los eventos reseñables de alterar la porosidad, como el efecto del vertido de la arena, del paso de las mareas diarias y

equinocciales, del oleaje constructivo y del paso de temporales. También se ha representado la porosidad relativa acumulada en cada perfil. Como en el caso de la playa Victoria, para una mejor comprensión de las figuras, la referencia temporal se ha establecido en días contados desde la regeneración de la playa.

La arena nativa de la playa de Camposoto está compuesta por arenas medias (D_{50} = 0,27 mm) y distribución pobremente clasificada, según los resultados de la muestra maestra. Dicha playa fue regenerada con arenas medias procedentes del placer de Meca (D_{50} = 0,32 mm). La arena nativa presentaba unos valores originales de porosidad en un rango de variación entre 30 y 36% aunque tras la regeneración la porosidad del perfil 2 llegó hasta el 40% (Figura 5.22a) y 5.22c). A corto plazo, justo tras el vertido de arena, todos los valores de porosidad tuvieron un comportamiento creciente, con diferencias relativas máximas de +19,3% y +32,5% en las estaciones P1M y P2A, respectivamente. Este comportamiento es muy similar al experimentado por el tamaño medio de grano, aumentando de 0,27 mm hasta 0,33 mm tras el vertido de arena.

Durante las primeras 24 horas (2 ciclos completos de marea), la porosidad continuó aumentando aunque de manera suave, con diferencias relativas menores al 5,6% respecto al valor anterior en P1A y en algunas estaciones se pudo observar un parón en dicho aumento. No obstante, cabe resaltar el comportamiento de la porosidad en las estaciones P1M y P2M pocos días después de la regeneración, las cuales experimentaron incrementos relativos de +26,8% y de +18,9% respectivamente).

A medio plazo, el efecto continuo de las mareas y especialmente el de las mareas vivas equinocciales provocaron un claro cambio de tendencia hacia el descenso de la porosidad en ambos perfiles con una diferencia relativa puntual de hasta un -6%. A largo plazo comenzó la recuperación de la porosidad acercándose a los valores originales (con una diferencia relativa máxima respecto al valor más elevado de -18,9% en el P2M) aproximadamente 260 días (8 meses) tras la regeneración. El resto de estaciones tuvieron una recuperación muy similar, en torno a los 250 días, aunque es cierto que algunas estaciones como la P1M o la P2A no recuperaron completamente su valor original en el intervalo de estudio realizado. Paralelamente a la porosidad, se observa, a largo plazo, una clara recuperación del tamaño medio de grano hasta niveles similares de la arena nativa (Figura 5.1).

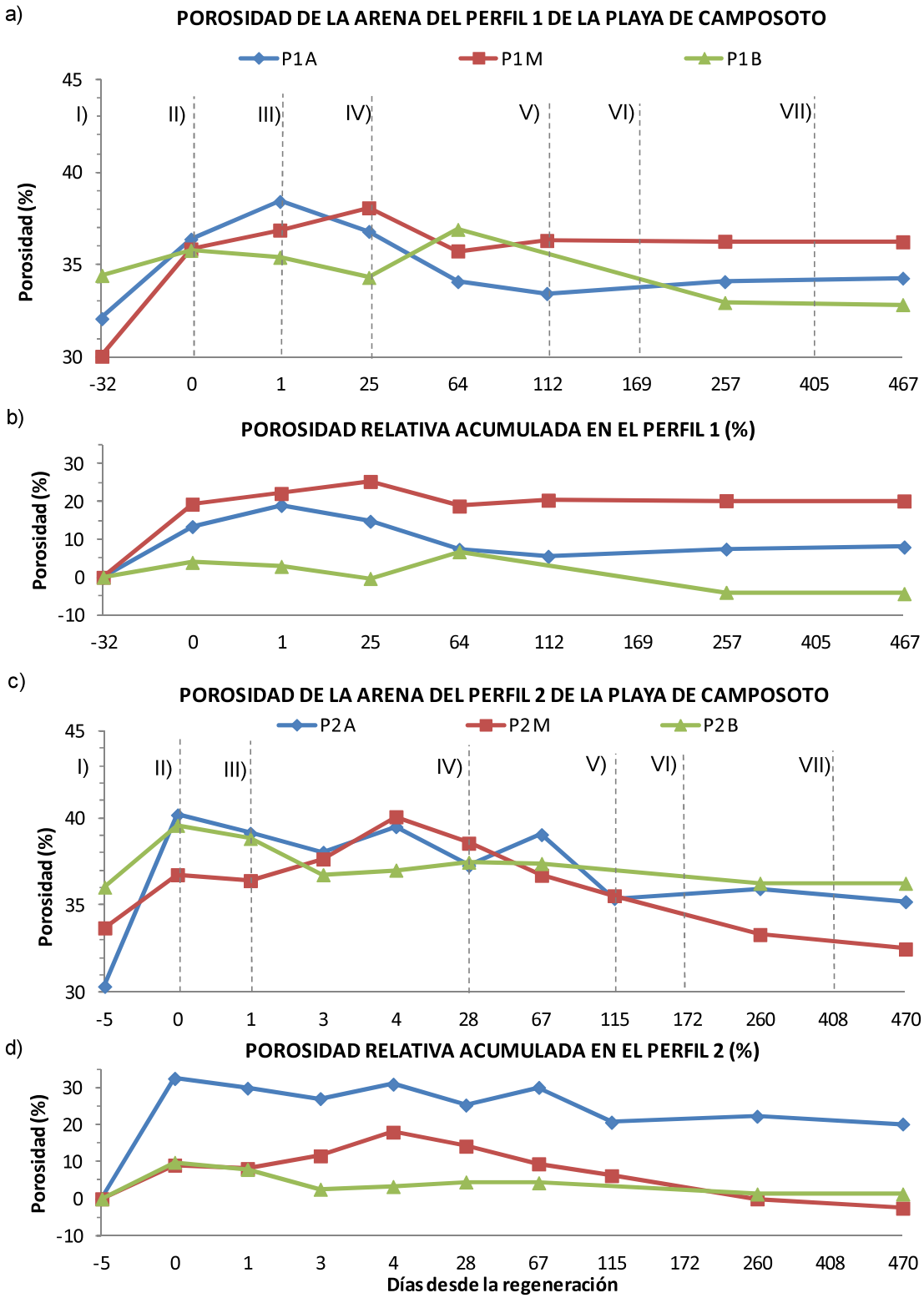


Fig. 5.22. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 2 perfiles de la playa de Camposoto (D_{50} = 0,27 mm; carrera de marea = 3,6 m; con cordón dunar). a: Variabilidad de la porosidad en P1; b) Porosidad relativa acumulada en P1; c) Variabilidad de la porosidad en P2; d) Porosidad relativa acumulada en P2. Notaciones: I) Porosidad de la arena nativa; II) inmediatamente después de la regeneración del perfil; III) tras 24h; IV) tras el efecto de las mareas equinocciales; V) tras un temporal con Hs = 5 m; VI) tras un temporal con Hs = 4 m; VII) tras un temporal con Hs = 4 m.

5.6.3. Playa Ballena

En el caso de la playa de La Ballena compuesta por arenas medias pobremente clasificadas (Tabla 5.3), se realizó un seguimiento de la densidad y porosidad a medio plazo tras la regeneración de la playa con arenas medio-gruesas de origen terrestre (cantera "El Palmar", T.M. Arcos de la Frontera). Se llevó a cabo un estudio previo de la densidad, humedad, compactación y porosidad de la arena de préstamo, tanto en estado natural (arena compactada en un frente) como en estado suelto (una vez tratada con medios mecánicos) y lista para la regeneración (Figura 5.23).

Fig. 5.23. Medidas de densidad de la arena de préstamo, en la cantera "El Palmar" (T.M. Arcos de la Frontera).

La densidad registrada en la arena de la zona de préstamo, tuvo unos valores de 1678 kg/m^3 y 4,4% de humedad en estado natural (compactada en el frente de pared), y de 1343 kg/m^3 y 4,8% de humedad en estado suelto (una vez cribada). El ensayo Proctor modificado mostró valores de densidad máxima de 1630 kg/m^3 para una humedad óptima de 10,3% (ANEXO II).

La **densidad** de la arena nativa de la playa de La Ballena tenía una variabilidad máxima entre 1545 kg/m^3 (P3A) y 1746 kg/m^3 (P1B). Tras el vertido de arena, hubo una divergencia de los valores de densidad, mostrándose menor en la zona seca y aumentando a lo largo del perfil según nos acercamos a la bajamar. En general se observó un descenso de la densidad, especialmente en el perfil 1 (Figura 5.24), con diferencias relativas de -16,3%, -6,0% y -3% en las estaciones P1A, P1M y P1B, respectivamente. Un mes después de las obras se aprecia cierta tendencia de recuperación de los valores a medio plazo. Asimismo, cabe destacar la no ocurrencia de grandes temporales durante el periodo de estudio, con alturas de ola significante siempre inferiores a 2,5 metros (Figura 5.16).

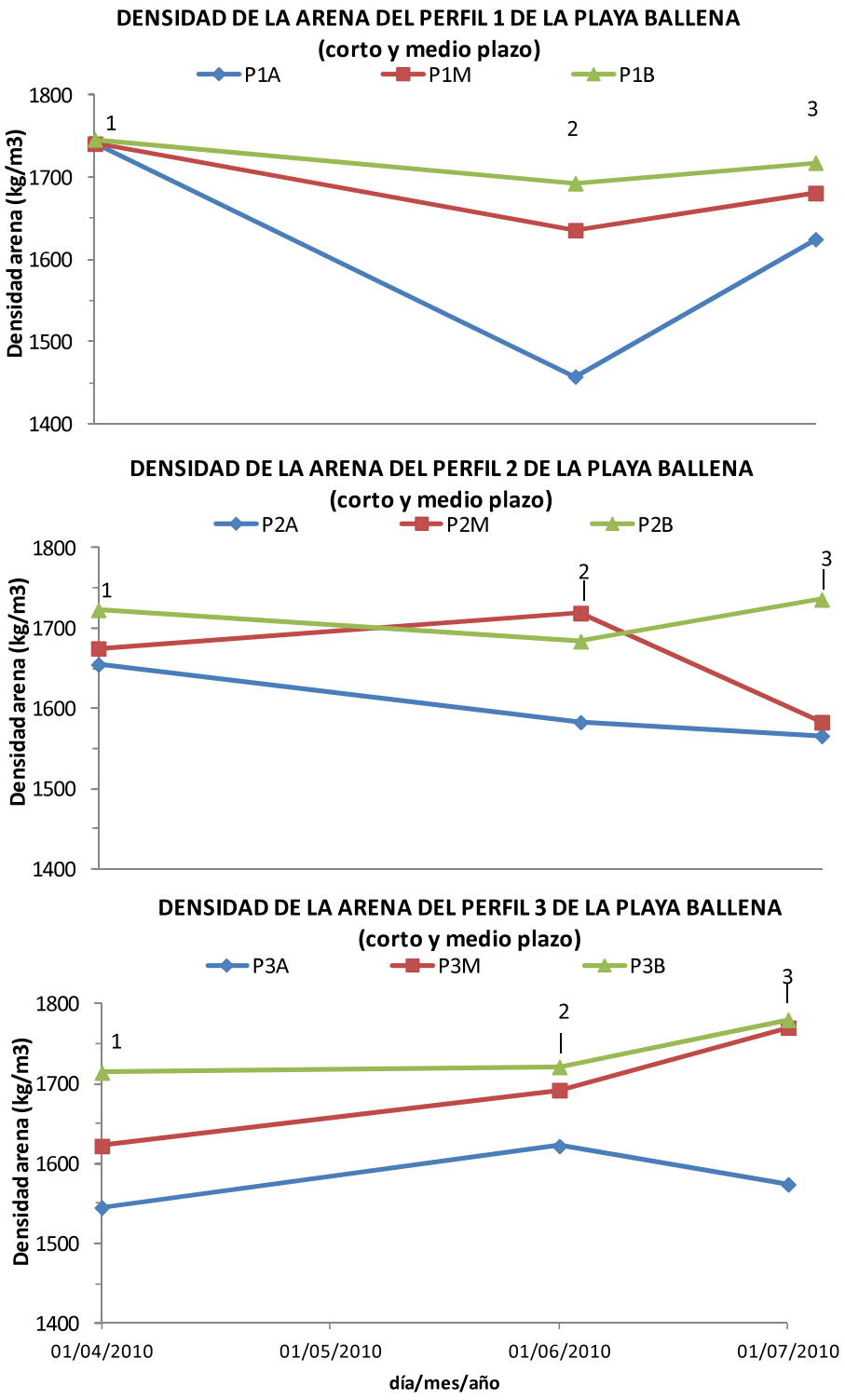


Fig. 5.24. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los perfiles 1, 2 y 3 de la playa de La Ballena a medio plazo (meses). Notaciones: 1: Densidad arena nativa playa; 2: Perfiles regenerados y paso de temporal (Hs=4 m); 3: Un mes tras las obras.

En cuanto a la **porosidad** calculada para las campañas realizadas en la playa de La Ballena (Figura 5.25), cabe destacar la diferencia existente de porosidad entre la arena de cantera (36,7%) y la arena nativa de la playa (34-42%).

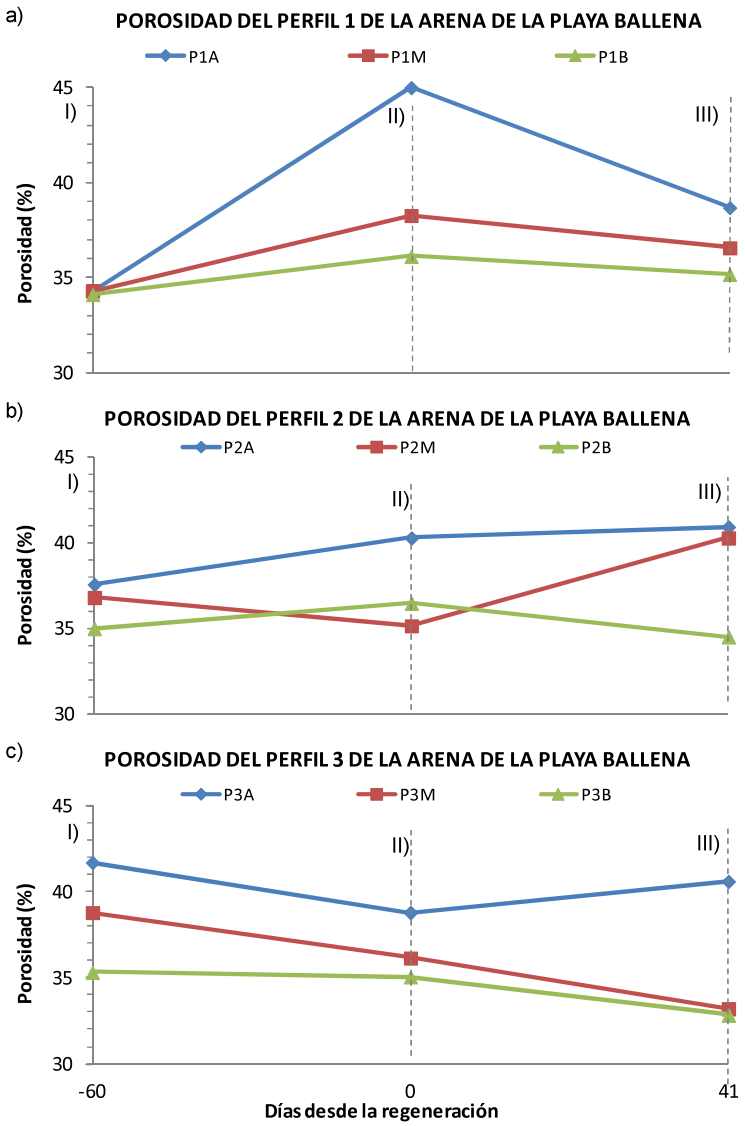


Fig. 5.25. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 3 perfiles de la playa de La Ballena (D_{50} = 0,34 mm; carrera de marea = 3,8 m; con acantilado en retroceso. a): Variabilidad de la porosidad en P1; b) Variabilidad de la porosidad en P2; c) Variabilidad de la porosidad en P3. Notaciones: I) Porosidad de la arena de playa nativa; II) inmediatamente después de la regeneración; III) Porosidad 41 días después de las obras.

Una vez regenerada la playa, la porosidad de la arena resultante de la mezcla ha aumentado de forma general en todos los puntos del perfil 1, alcanzado valores de porosidad hasta del 45% en el P1A (con una diferencia máxima relativa de +31,3%), y en la zona emergida del perfil 2 (+7,2%). En el resto de estaciones del perfil 2 y 3 la porosidad se

ha mantenido prácticamente constante y con diferencias mínimas, con la salvedad de las disminuciones de porosidad en los puntos P3A y P3M (en torno al -7,0%). Esta disminución de la porosidad tras la regeneración podría explicarse, en parte, por un descenso del tamaño de grano, según indica la muestra maestra. Según los resultados granulométricos (ANEXO I), la arena nativa en el punto P3M (anterior a la regeneración) estaba pobremente clasificada (*sorting* = 1,33 φ) y un D_{50} de 1,30 mm. Tras el vertido de la arena de préstamo (D_{50} = 0,49 mm) la arena de dicha estación resultó ser moderadamente clasificada (*sorting* = 0,99 φ), con un nuevo D_{50} de 0,62 mm. Un mes después de las obras se mantuvo el descenso de la porosidad en el P3M hasta el 33% (presentando una arena pobremente clasificada (*sorting* = 1,24 φ) y con un D_{50} = 1,00 mm), acumulando una diferencia relativa de -14,4% respecto al valor de la porosidad de la arena nativa.

5.6.4. Playa Fontanilla

La playa de La Fontanilla (T.M. Conil de la Frontera) es una playa semi-urbana compuesta por una arena nativa de composición media y fina principalmente (D_{50} = 0,21 mm) de distribución moderadamente bien clasificada (*sorting* = 0,58 φ). La playa fue regenerada con arenas similares procedentes del dragado de la bocana y alrededores del Puerto de Conil (D_{50} = 0,25 mm). Se tomaron datos de densidad y humedad a lo largo de un perfil transversal a medio (meses) y largo plazo (año). Paralelamente al estudio de la variabilidad de la densidad y porosidad, durante la regeneración de la playa, se tomaron medidas puntuales con el densímetro junto a la tubería de descarga y en la zona de escorrentía, siempre dentro del recinto habilitado para el vertido de arena (Figura 5.26). El registro de estas medidas permitió conocer la densidad y la porosidad de la arena recién vertida en la playa desde la tubería, sin ningún tipo de alisado o transporte (Tabla 5.19).

Fig. 5.26. Vista de las medidas tomadas en el interior del recinto, junto a la tubería de descarga (izd.) y en la zona de escorrentía (der.).

Tabla 5.19. Resultados de densidad, humedad y porosidad tras el vertido de arena de préstamo dentro del recinto habilitado en la playa La Fontanilla (bajo la zona de descarga y en la zona de escorrentía).

	Densidad (kg/m^3)	Humedad (%)	Porosidad (%)
Zona descarga	1552	7,9	41,4
Zona escorrentía	1497	23,6	43,5

Entre los valores de densidad de la arena recién vertida en la zona de descarga y la de escorrentía se registró una diferencia relativa de un 3,5%, mientras que dicha diferencia en el cálculo de la porosidad fue del 4,8%. Esta diferencia en la porosidad podría deberse a cambios en la granulometría debido a la pérdida del material fino por la escorrentía.

En lo que respecta al perfil transversal de la playa regenerada, en la Figura 5.27 se ha representado la evolución de los valores de densidad registrados a corto, medio y largo plazo.

La **densidad** del perfil de la playa Fontanilla se encuentra entre los 1650 kg/m^3 y los 1790 kg/m^3, presentando una variación muy clara a lo largo del tiempo. El descenso importante de los valores de densidad se registró pasado un mes tras la finalización de las obras, con unos descensos (respecto a la arena nativa) de -6,3%, -4,2% y -6,6% en el P1A, P1M y P1B respectivamente. Tras año y medio, y pese al paso de tres temporales con alturas de ola significante comprendidas entre 4 y 5 m, la tendencia general de la densidad fue recobrar los valores originales, salvo la estación P1M donde dicha variable continuó descendiendo hasta alcanzar una diferencia relativa de -7,2% respecto al valor de densidad de la arena nativa).

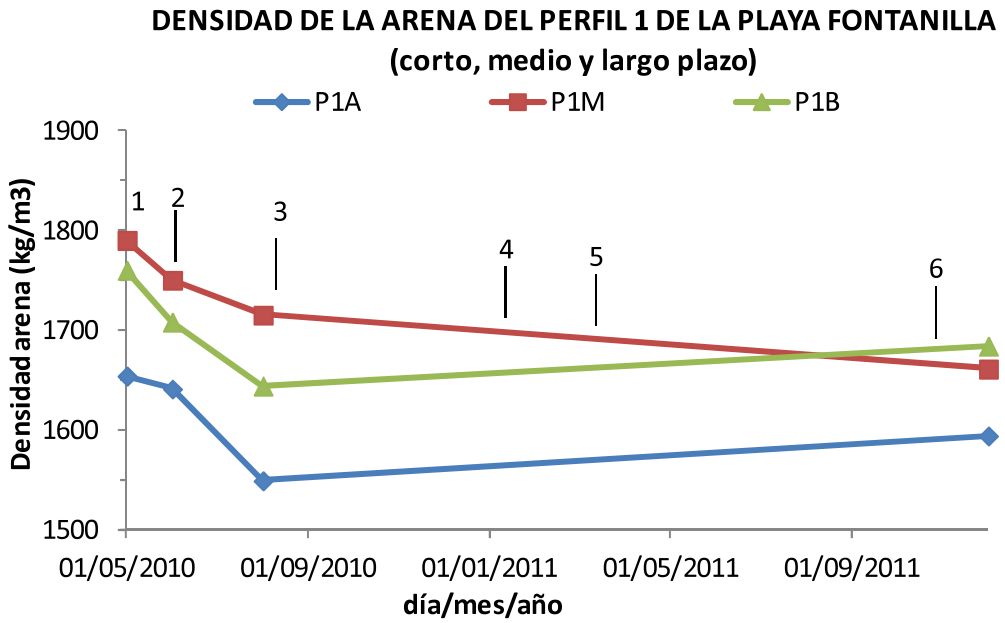


Fig. 5.27. Variabilidad de la densidad in situ registrada en el perfil de la playa de La Fontanilla a corto, medio y largo plazo. Notaciones: 1: Densidad arena nativa original; 2: Justo tras la regeneración; 3: Paso oleaje de verano (Hs<1 m); 4: Paso temporal (Hs=5 m); 5 y 6: Paso temporales (Hs=4 m).

En lo que respecta al seguimiento de la **porosidad** de la playa Fontanilla, justo tras la regeneración se detectaron suaves aumentos, con una diferencia relativa máxima de +5,9%, coincidiendo con un aumento importante del tamaño de grano (Figura 5.1). No obstante, es a los 43 días cuando se registraron los aumentos más significativos con diferencias relativas de +10,6%, +8,7% y +13,0% en el P1A, P1M y P1B, respectivamente (Figura 5.28). Aunque dicho aumento está dentro de los límites esperados, no se tiene registro de la ocurrencia de ningún acontecimiento que explique ese retardo en el aumento de la porosidad.

A largo plazo (año y medio), la porosidad tendió a recuperar los valores originales en la estación P1A y P1B, con descensos en torno al -4%, mientras que la porosidad de la estación P1M siguió una tendencia ligeramente ascendente, con una diferencia relativa acumulada de +15,0% respecto al valor de la arena nativa. Su diferenciación respecto a la estación P1B (también afectada por la acción marina) es la granulometría de ambas estaciones. Mientras que la granulometría de la arena de la estación P1M posee un tamaño de grano medio de 0,20 mm, la estación P1B posee un tamaño medio sensiblemente mayor de 0,28 mm (ANEXO I). Asimismo, cabe destacar la disminución del tamaño medio de grano a largo plazo, hasta recuperar valores similares a los originales de la arena nativa (Figura 5.1).

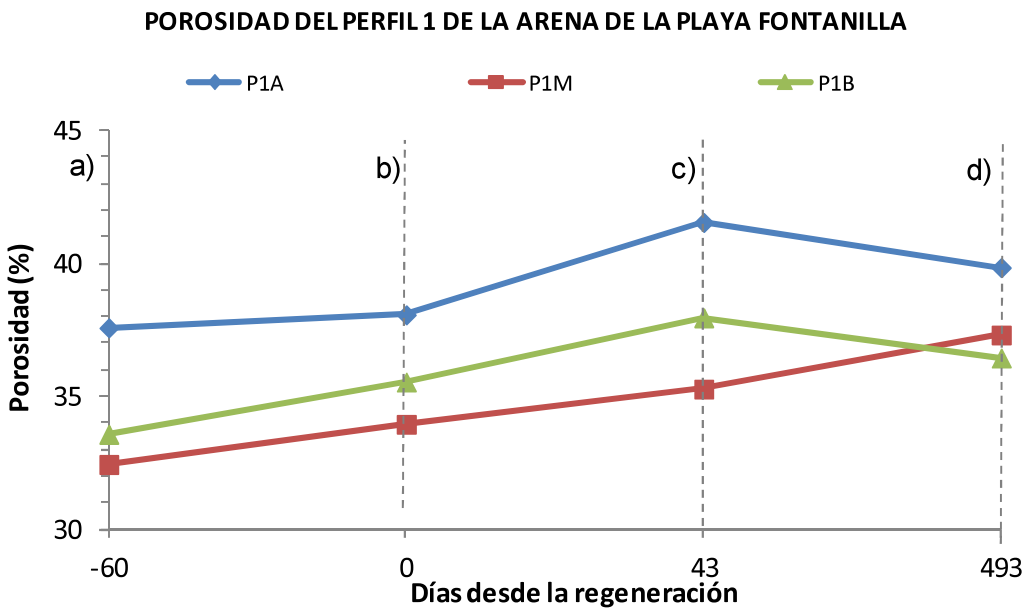


Fig. 5.28. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada en el perfil de la playa de La Fontanilla a corto, medio y largo plazo. Notaciones: a) Densidad arena nativa original; b) Justo tras la regeneración; c): Paso del oleaje de verano (Hs<1 m); d) Densidad tras pasos de temporales (Hs=4-5 m).

El paso de temporales con alturas de ola significante entre 4 y 5 metros, no parece haber tenido la misma influencia sobre la porosidad de la zona intermareal (con una tendencia claramente creciente) y sobre la zona próxima a la bajamar. En este caso de estudio, tampoco ha quedado suficientemente claro el efecto de los temporales en la porosidad de la arena.

5.6.5. Playa Atunara

En la playa de La Atunara, sita en el término municipal de La Línea de la Concepción, se han establecido dos perfiles transversales (P1 y P2) en una zona de playa urbana que cuenta con un paseo marítimo adosado a la playa y varios espigones transversales. La playa fue regenerada con arenas medio-gruesas procedentes del dragado del puerto de La Atunara (Tabla 5.1). En cada perfil de la playa de La Atunara se han tomado 3 estaciones de muestreo en la zona emergida de la playa (A), otra estación en la estrecha franja marcada por la zona intermareal (M) y en la zona más próxima a la bajamar media (B).

Cabe mencionar que esta playa se sitúa en la vertiente mediterránea de la costa de Cádiz, donde el rango de marea es pequeño en comparación con las mareas de la parte atlántica. Debido a las elevadas pendientes de los perfiles transversales en esta playa (≈10%) en comparación con las playas atlánticas (≈2%) y por tanto a la escasa carrera de

marea, se decidió no estudiar el efecto de la marea en esta playa. La arena nativa de la playa La Atunara cuenta con arenas medias y gruesas (D_{50} = 0,59 mm) pobremente clasificadas (*sorting* = 1,32 φ) y se realimentó con arenas medias pobrremente clasificadas del Puerto de La Atunara (D_{50} = 0,37 mm).

En la Figura 5.29, se representa la variación de la **densidad** registrada en todas las estaciones de los perfiles a lo largo de las campañas llevadas a cabo. La densidad de la arena natural de la playa Atunara ha mostrado un rango máximo de densidades de entre 1700 y 1970 kg/m^3, siendo mucho mayor las densidades de las zonas próximas a la bajamar que las de la zona seca, debido en parte a su mayor contenido de agua. Justo tras el vertido de la arena, excepto la estación P1A (que no había sido afectada aún), todas las estaciones registraron un descenso importante de sus respectivas densidades, hasta un máximo de -12,5% en el punto P1B. Un mes tras la finalización del vertido y tras el temporal acontecido en abril de 2011 (Figura 5.16), la densidad de la arena continuó descendiendo, especialmente en los puntos P2M y P2B, donde la diferencia relativa acumulada, respecto al estado original fue de -15,7 y -20,2% correspondientemente. La estación P1A mostró su disminución de la densidad con cierto retraso respecto al resto de puntos, y en el resto de estaciones (P2A, P1M y P1B) la densidad comenzó a recuperarse. La diferencia de comportamiento entre los puntos afectados por la acción marina (P1M, P1B, P2M y P2B) podría deberse a que el Perfil 1 se encuentra abrigado por el Puerto deportivo y por la presencia de los espigones transversales (de ahí su mayor anchura de playa), mientras que el Perfil 2 está más expuesto al oleaje y por tanto a la acción de los temporales. En este caso, parece que el temporal de abril de 2011 erosionó en parte la playa y posteriormente depositó un gran volumen de arena sobre el perfil 2, especialmente en las estaciones P2M y P2B. Posiblemente debido a esa sedimentación masiva (quizás similar a la del vertido antrópico), los granos de arena se han podido disponer desordenadamente, mostrando una disminución importante de la densidad en el perfil más expuesto al oleaje.

A largo plazo (10 meses), cabe destacar la recuperación paulatina de los valores de densidad de todas las estaciones, incluyendo las estaciones P2M y P2B, que mostraron un aumento de densidad con una diferencia relativa de +14,8 y +23,3%, respectivamente, con una clara tendencia a recuperar el valor original de densidad. En este caso, a diferencia del temporal de abril, los pequeños temporales acontecidos en noviembre y diciembre de 2011, no cambiaron la tendencia de recuperación de los valores de densidad.

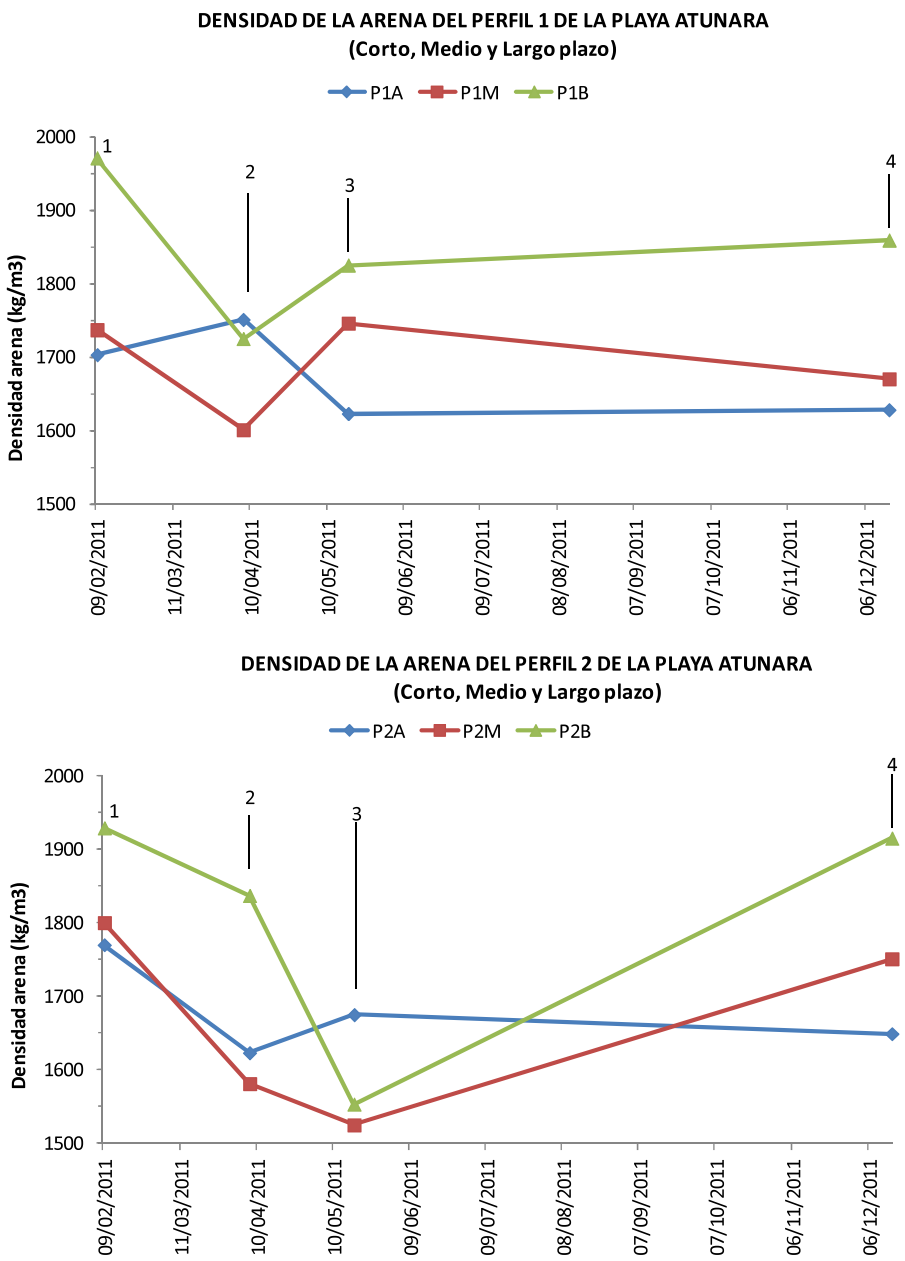


Fig. 5.29. Variabilidad de la densidad in situ registrada en los perfiles de la playa Atunara a corto (días), medio (3 meses) y largo plazo (10 meses). Notaciones: 1: Densidad original; 2: Perfiles regenerados; 3: tras paso temporal (Hs=4 m); 4: tras paso de temporal (Hs<3 m).

Tras el cálculo de la **porosidad** a partir de la densidad seca registrada in situ, en la Figura 5.30 se muestra su variabilidad en la playa Atunara a lo largo del año 2011, así como su diferencia relativa acumulada y su correspondencia con la altura de ola significante para todo el periodo de estudio.

Los valores de la porosidad de la arena nativa de la playa Atunara fueron sensiblemente menores que las registrados en las playas Victoria y Camposoto, con un rango de variación entre 25,6% y 35,7% (Figura 5.30a y 5.30c). Inmediatamente después de

que la arena fuera vertida en la playa se midió la porosidad con el densímetro, registrando incrementos máximos en la zona emergida de +16,7%, en la zona intermareal de +25,8% y en la zona más próxima a la bajamar (+36,2%). Cabe destacar la elevada variabilidad de la porosidad justo tras el vertido de arena, mostrando un rango máximo en el perfil 2 (entre 30 y 40%).

En el medio plazo, 41 días después del vertido de arena y coincidiendo con un temporal con H_s=4 m, la estación P2B siguió incrementando su porosidad considerablemente, alcanzando un valor de 41,4%, con una porosidad relativa acumulada de +47,7% (Figura 5.30d). Sin embargo, la porosidad de las estaciones P1M y P1B decrecieron aproximadamente un -14% y -11, alcanzando y manteniendo un valor similar al original a medio y largo plazo.

A largo plazo, la porosidad recupera los valores originales, especialmente en el perfil 2, con descensos de la porosidad de -20,1% y -33,0% respectivamente en el P2M y P2B. En este sentido, es importante resaltar que el perfil 2 ha mostrado una mayor variabilidad de la porosidad que el perfil 1. El paso de un pequeño temporal (H_s<3 m) no parece haber tenido una entidad suficiente para influir en la tendencia decreciente de la porosidad. También cabe destacar la tendencia de la granulometría de la playa a reducir paulatinamente su tamaño medio de grano, alcanzando valores de arenas medias y gruesas típicas del entorno (D_{50} = 0,49 mm), frente a los valores nativos de 0,59 mm, según las muestras maestras calculadas (ANEXO I).

De forma general, a lo largo de todo el periodo de estudio, la porosidad de las arenas de las playas estudiadas ha mostrado una variabilidad comprendida entre un 25,6% y un 45%, lo que supone hasta una diferencia relativa máxima superior al 43%. La literatura consultada sostiene la variabilidad exhibida en las playas estudiadas (Tabla 5.20).

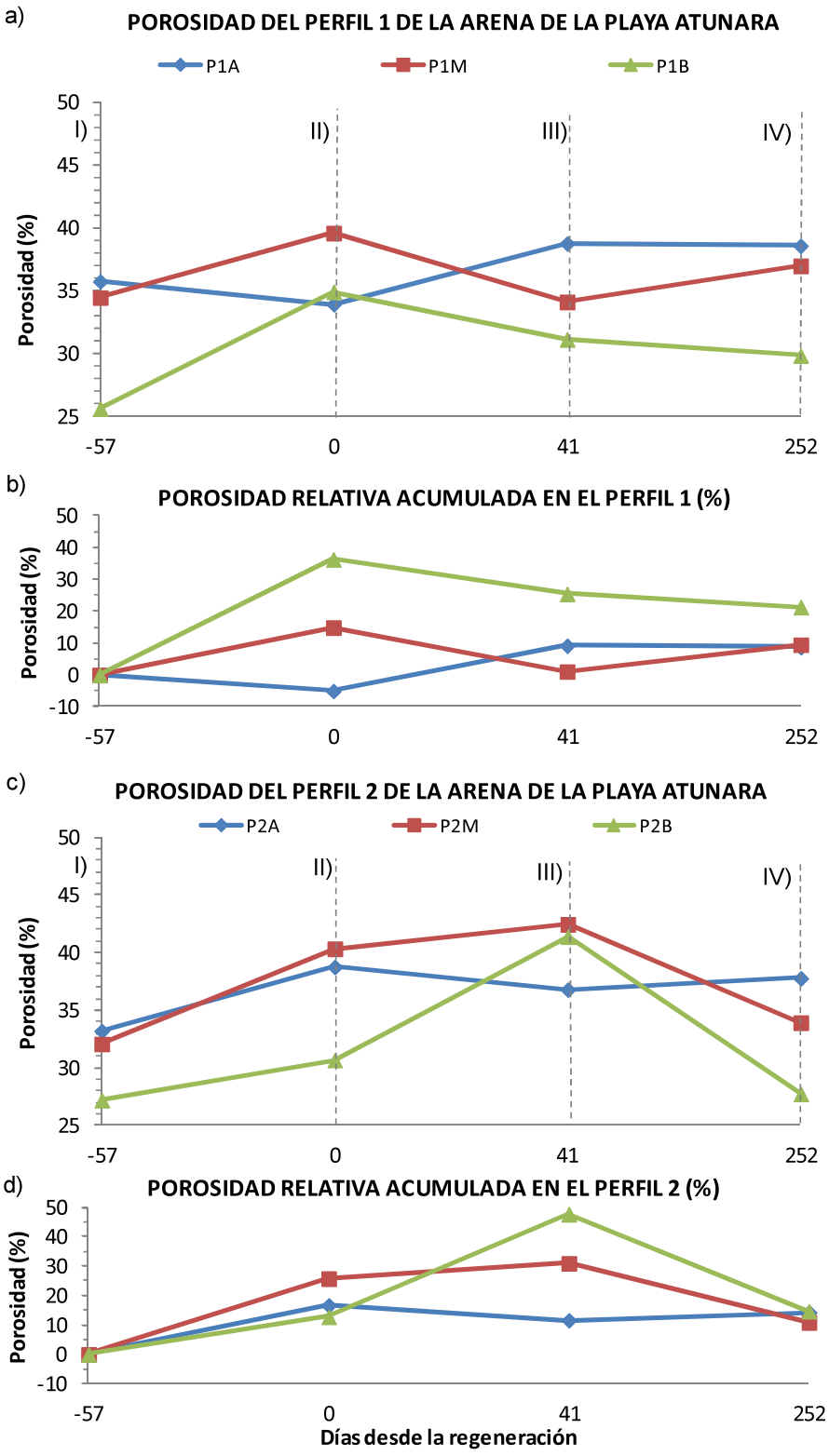


Fig. 5.30. Variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena calculada para cada estación de los 2 perfiles de la playa Atunara (D50 = 0,59 mm; carrera de marea = 1,5 m; con puerto adosado y diques transversales). a): Variabilidad de la porosidad en P1; b) Porosidad relativa acumulada en P1; c) Variabilidad de la porosidad en P2; d) Porosidad relativa acumulada en P2. Notaciones: I) Porosidad de la arena nativa; II) inmediatamente después de la regeneración del perfil; III) tras un temporal con Hs=4 m; IV) tras un temporal con Hs<3 m.

Tabla 5.20. Datos históricos de porosidad publicados. Adaptado de Curry et al. (2004) y actualizado.

		Porosidades de arenas (%)		
Autores	Año	Compactada	Natural	Suelta
King	1899	32	36,8	40
Ellis and Lee	1919	-	40 - 46,5	-
Meinzer	1923	-	48	-
Terzaghi	1925	39	-	49
Trask	1931	-	-	45,5 - 47,4
Graton and Fraser	1935	26	35 - 40	47,6
Fraser	1935	-	41,6 - 44,2	-
Tickell and Hiat	1938	37,6 - 39,4	-	-
Kolbuszewski	1948	31,6	-	49,7
Gaither	1953	36 - 37,7	-	-
Hamilton and Menard	1956	-	38,3 - 47,7	-
Ludwick	1956	-	-	39,9 - 47,9
Breslau	1967	-	39,1 - 48,2	-
Erchul and Nacci	1972	35,8	-	42,3
Pryor	1972	-	45,0 - 50,8	-
Beard and Weyl	1973	23,4 - 43,5	40,8 - 44	-
Erchul	1974	26 - 32	39,5 - 41,0	40 - 47
Jackson	1975	37,9 - 38,5	39	46,5 - 48,0
Jackson et al.	1978	33 -60	-	42 - 66
Hamilton and Bachman	1982	35	38,6 - 48,5	-
Packwood	1983	-	30	-
Arulanandan	1991	32	-	44
Briggs	1994	-	36,5 - 44,0	-
Dickinson and Ward	1994	-	19,6 - 45,6	-
Bennett	1999	39 - 40	-	42 - 43
Bennett et al.	1999	37,5	41,6 - 44,5	42
Evans	2001	-	46,5 - 51,0	-
Faas	2001	37,0 - 42,2	-	45,3 - 48,9
Richardson et al.	2001	-	36,0 - 39,9	-
Chuhan et al.	2002	24,8 - 32,5	44,5 - 48,8	-
Tang et al.	2002	37,2	-	39,9
U.S. Army Corps of Engineers	2002	25	40	50
Wheatcroft	2002	-	37,8	-
Curry et al.	2004	39,3	-	51,2
Van Rijn	2007	-	35	-
Briggs et al.	2010	-	36,6	-
Reed et al.	2010	-	36,7 - 43,6	-
Román-Sierra et al.	2014	-	25,6 – 43,4	-
Valores medios históricos		**35,0**	**40,6**	**45,9**

CAPÍTULO SEXTO

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Análisis granulométricos

Con el fin de una mayor comprensión de la variabilidad de la porosidad de la arena tras una regeneración de playa, se ha demostrado primordial la determinación del tamaño de grano y la clasificación del sedimento. Además de ser usados para describir diferentes facies y clasificar ambientes sedimentarios (Shepard, 1954), juegan un papel principal en el transporte y deposición del material granular (Gutiérrez-Más et al., 2003). En este contexto, el tamaño de grano proporciona aspectos importantes de la procedencia del sedimento, del transporte histórico y de las condiciones de sedimentación (Folk y Ward, 1957). Es por ello que en esta investigación se le ha dado una gran importancia a su caracterización, desarrollando y optimizando la metodología del análisis granulométrico (Román-Sierra et al., 2013) definida por otros autores. De esta manera, dicha metodología y los resultados obtenidos se han concebido como uno de los pilares principales para la consecución de los objetivos de esta Tesis.

Los principales resultados de los análisis granulométricos de las muestras maestras han mostrado arenas nativas y de préstamo de tamaños medios y en general moderadamente clasificadas. Justo tras el vertido de arena, el tamaño medio de grano aumentó considerablemente en casi todas las playas. A largo plazo, los parámetros estadísticos que definen la granulometría de la arena recuperaron en parte sus valores nativos originales, aunque siempre con una tendencia hacia menores tamaños y mejor clasificados. En los casos concretos de las playas Ballena y Atunara fueron regeneradas con arenas más finas que las nativas, por lo que no se registró un incremento del tamaño de grano tras el vertido. La tendencia fue siempre decreciente, mostrando un cambio final de grosor, más acorde con los valores naturales encontrados en sus entornos.

De forma general, la caracterización métrica y estadística de la arena, desarrollada paralelamente a las medidas de densidad en cada campaña, ha permitido una mejor comprensión de la variabilidad de la porosidad.

6.2. Análisis de la densidad y porosidad de la arena

En cuanto a los ensayos de precisión y comparación entre las diferentes metodologías para el cálculo de la densidad y/o porosidad de la arena (probetas, testigos de acero y densímetro), el densímetro nuclear se ha determinado como la técnica más precisa, fiable y de fácil aplicabilidad. Este método ha permitido obtener in situ y de manera inmediata datos de densidad seca y humedad del terreno. Se trata de una técnica normalizada y estandarizada (ASTM D6938, 2010), no destructiva del lecho costero y que no necesita recoger muestras ni análisis posteriores. Requiere, por tanto, una menor intervención humana (que pueda alterar la muestra en su traslado o posterior gestión en laboratorio), permitiendo una mayor maniobrabilidad y comodidad.

Asimismo es posible la estimación del porcentaje de compactación del suelo a través de un ensayo Proctor modificado. Este test indica el potencial de compresión (es decir, máxima densidad) de varias arenas sometidas al mismo incidente energético. Los resultados mostraron que la arena de préstamo utilizada para la regeneración de las playas tuvo menos capacidad de compactación que la arena nativa. Este aspecto ha sido un factor importante para el estudio de la variabilidad de la porosidad tras el vertido de dicha arena.

La variabilidad en la medición de la densidad debido a la heterogeneidad del terreno cuenta con una desviación estándar del 1,4% en la zona emergida de la playa y del 0,2% en el intermareal. En cuanto a la precisión del densímetro debido a la situación de la base del aparato, este experimento ha mostrado que su variabilidad es prácticamente nula, con una diferencia absoluta y relativa de la porosidad de 0,2% y 0,0%, respectivamente. En el caso de los ensayos realizados repetitivamente en el mismo punto (zona seca e intermareal de la playa Victoria), los resultados mostraron una diferencia relativa máxima en las medidas de densidad y porosidad en torno al 1 y al 2% respectivamente. Respecto al tiempo de medición de densidad y porosidad, se comparó un tiempo de 15 y 60 segundos, donde las diferencias relativas de los valores medios fueron de 0,5% y 0,9%, respectivamente para ambos intervalos de tiempo. A pesar de que todas las medidas a lo largo de esta Tesis se realizaron durante un intervalo de 60 segundos (según norma ASTM D6938 (2010), cualquier descuido del operario al programar un menor intervalo de tiempo en el densímetro, no hubiera supuesto un error significativo.

6.3. Variabilidad de la porosidad en la playa Victoria

La porosidad de la arena aumentó considerablemente tras el vertido de arena hasta una diferencia relativa máxima de +11,6%. Doce horas después del vertido y tras el paso de un ciclo de marea, la porosidad continuó su aumento aunque en menor medida, comenzando a decrecer en las zonas más afectadas por la carrera de marea. En este sentido, es tras el paso de las mareas vivas equinocciales cuando sucede un descenso generalizado de la porosidad en todas las estaciones, con diferencias relativas máximas de hasta -12,5%. A medio y largo plazo, 8 meses después de la regeneración de la playa, todos los valores de porosidad decrecieron (hasta un -10%) hasta alcanzar niveles similares a los de la arena nativa. Esta recuperación parece haberse debido al efecto diario de las mareas y al constante oleaje aunque poco energético a lo largo de toda la cota de inundación de la playa.

A pesar de haber registrado algún incremento puntual de la porosidad en alguna estación, no parece que los temporales acontecidos en el tramo final (con alturas de olas entre 4 y 5 metros) hayan supuesto variaciones reseñables en dicha tendencia.

Una de nuestras primeras hipótesis fue suponer que el efecto de oleajes severos durante los temporales podrían producir una alteración de la estructura sedimentaria similar a la producida tras un vertido masivo de arena (Figura 1.1). No obstante, tanto en vertidos de arena desde una draga (arena y agua) como desde un camión (arena seca), se han registrado importantes aumentos de porosidad (disminución de densidad) en todas las playas, lo cual no se ha registrado tras los temporales. Podría ser que las diferentes velocidades de caída de los granos durante la sedimentación natural tras los temporales, ha determinado una porosidad distinta a la alcanzada tras un vertido artificial, sin provocar esa estructura granular desorganizada. La velocidad de caída del grano, así como sus parámetros granulométricos deberían tenerse en cuenta en los próximos estudios que se realicen sobre el efecto de los temporales en la porosidad de la arena.

6.4. Variabilidad de la porosidad en la playa Camposoto

A corto plazo, justo tras el vertido de arena, todos los valores de porosidad tuvieron un comportamiento creciente, con diferencias relativas máximas de +19,3% y +32,5% en las estaciones P1M y P2A, respectivamente.

Durante los dos primeros ciclos completos de marea (24 horas después del vertido) la porosidad continuó aumentando aunque de manera suave, con diferencias relativas menores al 5,6% respecto al valor anterior. A medio plazo, la acción continua de las mareas diarias y especialmente el efecto de las mareas vivas equinocciales provocaron un claro descenso de la porosidad en ambos perfiles con una diferencia relativa de hasta un -6%, siendo éste el punto de inflexión entre la tendencia creciente y la decreciente de la porosidad. A largo plazo disminuyó hasta un -18,9%, alcanzando valores similares a los originales de la arena nativa aproximadamente entre 8 y 9 meses tras el vertido de arena, aunque algunas estaciones no recuperaron completamente la porosidad original en el intervalo de estudio realizado.

Posiblemente, y al igual que en el caso de la playa Victoria, el hecho de que se haya añadido una arena con mayor granulometría que la nativa, podría ser una de las razones de que a algunas estaciones les cueste más tiempo volver a los valores naturales de porosidad que a otras. También se presume que otros factores como el grado de clasificación de la arena (sorting), así como la forma y la composición de los granos puede influir en la disposición de la estructura y por tanto en la densidad y porosidad del sedimento, lo cual debería abordarse en futuras investigaciones.

A pesar de los temporales acontecidos 110 y 170 días después de la regeneración, con alturas significantes de oleaje de 5 y 4 metros respectivamente, la porosidad de la arena siguió una tendencia decreciente en ambos perfiles. No obstante, al igual que en la playa Victoria, los temporales no parecen haber tenido un papel importante en la tendencia decreciente de la porosidad, aunque bien es cierto que dicha tendencia tiende a estabilizarse tras el último temporal ocurrido 400 días después de las obras (Hs = 4 m).

6.5. Variabilidad de la porosidad en la playa Ballena

En el caso de la playa La Ballena, regenerada con arenas de origen terrestre (cantera), la porosidad aumentó considerablemente tras la regeneración de la playa, especialmente en las zonas emergidas, con diferencias relativas máximas hasta +31,3%. Asimismo, se han detectado anomalías aisladas en el comportamiento de la porosidad en uno de los perfiles estudiados, descendiendo un -7% tras el vertido de arena. Este descenso podría explicarse por un cambio muy brusco en el tamaño de grano debido a una masiva presencia de arenas de cantera en la zona de medida que se depositaron como reservorio frente a futuros temporales, y que no llegaron a mezclarse con la arena nativa. Estas

marcadas diferencias de clasificación y tamaño medio de grano, parecen haber influido en la variabilidad de la porosidad de la arena tras la regeneración. Asimismo, las estaciones estudiadas no presentan el patrón típico de perfil transversal con arena más gruesa en la zona de bajamar y más fina en la zona emergida. Según Blott y Pye (2001), la mezcla de arenas con una granulometría tan diferente, puede provocar un gradiente de selección inverso al determinado de forma natural por la sedimentación selectiva de la arena nativa, estando en función del peso de las distintas partículas que son transportadas por las corrientes inducidas por el oleaje y la carrera de marea a lo largo del perfil transversal (Nielsen et al., 2001), además del viento (Emery, 1945).

En algunas estaciones se registró un leve descenso de la porosidad con tendencia a recuperar los valores originales anteriores a la regeneración. No obstante, esta recuperación no llegó a registrarse en su totalidad en todas las estaciones durante el periodo de estudio realizado.

6.6. Variabilidad de la porosidad en la playa Fontanilla

Después de la regeneración de la playa, se detectaron aumentos significativos de un +6% y de hasta un +13%, confirmando la tendencia creciente de la porosidad tras el vertido de arena. A largo plazo se observa una clara tendencia a recuperar los valores originales de porosidad en las estaciones P1A y P1B. El paso de temporales con alturas de ola significante entre 4 y 5 metros, no parece haber tenido la misma influencia sobre la porosidad de la zona intermareal (con una tendencia claramente creciente) y sobre la zona próxima a la bajamar. En este caso, tampoco ha quedado suficientemente claro el efecto de los temporales en la porosidad de la arena. No obstante, revisando los resultados granulométricos, parece que las diferencias encontradas en el tamaño medio de grano, podrían explicar diferentes comportamientos de la porosidad entre estaciones cercanas como la P1M y P1B.

6.7. Variabilidad de la porosidad en la playa Atunara

La porosidad registrada en la arena nativa de la playa Atunara fue menor que la registrada en las playas de la vertiente atlántica, con un rango de variación entre 25,6% y 35,7%. Según Beard y Weyl (1973) y USACE (2002), las bajas porosidades pueden deberse, entre otros factores, a la pobre clasificación del sedimento como es el caso de la playa de La

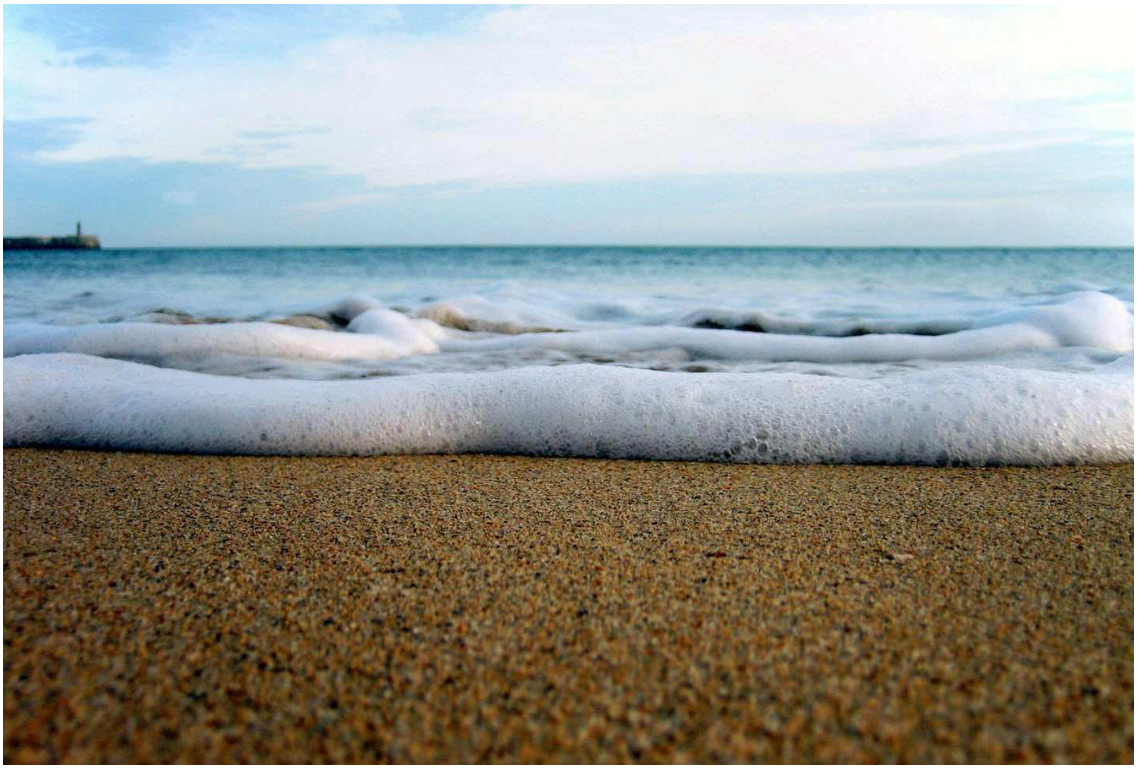
Atunara (Tabla 5.3). Justo después del vertido, la porosidad aumentó considerablemente en la zona emergida (+16,7%), en la zona intermareal (+25,8%) y en la zona más próxima a la bajamar (+36,2%).

Un mes tras la regeneración, coincidiendo con un temporal con Hs=4 m, la porosidad siguió incrementándose, especialmente en la estación P2B, alcanzando un valor de 41,4%, con un +47,7% de incremento acumulado desde los valores de porosidad original. Las grandes diferencias en la porosidad se han registrado especialmente en la zona baja de influencia marina, mostrando escasas variaciones en las zonas emergidas de la playa. En este sentido, es importante resaltar que el perfil 2 ha mostrado una mayor variabilidad de la porosidad que el perfil 1. No obstante, la diferencia de comportamiento detectada entre las zonas bajas de ambos perfiles podría haberse debido a la diferente exposición al oleaje dada la situación de algunos pequeños espigones transversales en la playa (Figura 3.9).

El comportamiento de la porosidad de la arena del perfil 2 de la playa Atunara cumple las principales hipótesis de esta Tesis: La arena aumenta su porosidad justo tras la regeneración y los oleajes erosivos producidos por temporales pueden afectar a la estructura sedimentaria provocando un aumento de dicha variable. Además, la arena recupera sus valores de porosidad originales, pero no antes de 8 meses (Figura 5.30d).

En el caso de esta playa, el tamaño medio de grano aportado fue menor al nativo, con una clara tendencia decreciente todo el tiempo. A diferencia que en el resto de playas, donde la porosidad aumentaba paralelamente al tamaño de grano tras el vertido de arena, en este caso parece indicar que la variación del tamaño medio de grano no es condición suficiente para un comportamiento similar de la porosidad.

CAPÍTULO SÉPTIMO



RESUMEN Y CONCLUSIONES.
NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En esta Tesis Doctoral se ha presentado una metodología rápida y sencilla para conocer los cambios de porosidad sucedidos en la arena de playa tras su regeneración. Se ha demostrado que es posible medir in situ la densidad aparente y la humedad de un volumen superficial de arena de playa mediante un densímetro nuclear. Esta novedosa aplicación desarrollada en esta Tesis ha sido aplicada en diferentes tipos de playas, respecto al rango de marea, tamaño de grano, morfología y confinamiento de la playa, presencia de infraestructuras antrópicas, etc. Subsecuentemente, se ha desarrollado una formulación fácil y precisa para obtener valores de porosidad a través de los datos recogidos in situ de densidad y humedad. Esta metodología de cálculo de porosidad se ha ido realizando en diferentes campañas a lo largo del tiempo tras la regeneración de varias playas.

7.1. Resumen de la metodología utilizada

Tras el estudio del estado del arte, se han analizado diferentes técnicas de ensayo para la obtención de la densidad y porosidad de la arena de playa. Dichas metodologías se han basado en fundamentos físicos (métodos volumétricos y de pesada), químicos (empleo de gases químicos) y nucleares (métodos de radiación nuclear). Paralelamente al estudio de la densidad y porosidad de la arena, mediante el uso de una hoja de cálculo de realización propia se han desarrollado análisis granulométricos y cálculo de parámetros estadísticos como: el tamaño medio de grano (D_{50}), la clasificación del sedimento (*sorting*), la simetría (*skewness*) y el apuntamiento (*kurtosis*) de la distribución por tamaños (Folk, 1974), optimizando el tiempo de tamizado sin sacrificar la eficiencia y precisión del análisis (Román-Sierra et al., 2013).

En cuanto a la metodología desarrollada para los ensayos granulométricos, se ha establecido que con 10 minutos de tamizado es tiempo suficiente para realizar análisis granulométricos fiables y precisos en arenas medias de playa y duna, asumiendo errores relativos despreciables, revelando que otras sugerencias previas (Syvitski, 1991 y USACE, 2002) de tiempos mayores pueden ser consideradas como meras guías (Román-Sierra et al., 2013).

Las técnicas volumétricas utilizadas se han basado en la toma de un volumen conocido de arena mediante cores de PVC y probetas de plástico para su posterior traslado y determinación de la porosidad en el laboratorio. Las técnicas de pesada se han llevado a cabo a partir del muestreo de arena mediante testigos de acero inoxidable con volumen interior conocido y la determinación posterior de la densidad aparente en el laboratorio. Las técnicas de adición de gases químicos han consistido en el estudio de la densidad real del material recogido en playa mediante el uso de un picnómetro de inyección de Helio. Las técnicas de control nuclear se han basado en la utilización de un densímetro nuclear para la determinación de la densidad seca del material (mediante la interacción de rayos gamma con los átomos del suelo), así como la caracterización del porcentaje de humedad (emisión de neutrones que colisionan con los átomos de Hidrógeno del agua).

7.2. Ventajas e inconvenientes de cada método

La metodología de los cores de PVC resultó poco práctica dado el gran tamaño de muestra de arena requerido, su traslado y posterior manipulación en laboratorio. Debido a los volúmenes de agua y recipientes demandados, las lecturas visuales no fueron muy precisas suponiendo errores superiores al 6%.

El método de las probetas de plástico, supuso una elevada variabilidad del índice de granos y poros en los ensayos realizados por triplicado en la misma zona de muestreo, con una desviación típica de hasta el 8% en la zona intermareal.

Respecto a la técnica de los testigos de acero inoxidable se han obtenido índices muy similares entre sí, con una desviación típica insignificante (0,01%). No obstante, los valores de porosidad obtenidos tienen una diferencia relativa de +15% respecto a la técnica de las probetas y respecto al densímetro nuclear. Por otra parte, la principal limitación de la metodología se basa en su mayor intervención humana al tener que recoger las muestras en playa y transportarlas a laboratorio, aumentando así la posibilidad de alteración y alargando considerablemente el tiempo de análisis.

La utilización del picnómetro de Helio ha permitido medir la densidad real del sólido, no la densidad aparente del material. En los ensayos realizados en esta Tesis, la densidad real media obtenida ha sido de 2,73 gr/cm^3. No obstante, para esta investigación se ha utilizado el valor de referencia más comúnmente utilizado de 2,65 gr/cm^3 (2650 kg/m^3), con el fin de que las conclusiones de la presente Tesis Doctoral y la aplicabilidad de su metodología sean de carácter general.

Respecto a la metodología del densímetro nuclear, las especificaciones técnicas del fabricante del aparato detallan que la precisión del densímetro debidamente calibrado es de ±3,4 kg/m^3 para las medidas de densidad. Según nuestros ensayos de precisión realizados directamente sobre el terreno, la variabilidad de las medidas de densidad debida a la medición del aparato (realizadas durante 60 segundos según la norma ASTM D6938, 2010) mostró una desviación estándar de ±8,3 kg/m^3, con una diferencia relativa máxima del 1,3%. En el caso de la variabilidad de las medidas debida a la heterogeneidad del terreno mostró una desviación estándar de ±6,1 kg/m^3 en la zona intermareal de la playa. En el caso de los ensayos realizados sobre la posición de la base del densímetro en el momento de la medición, se concretó una diferencia relativa despreciable en torno al 0,0%.

7.3. Comparación de resultados entre los distintos métodos.

El método de las probetas muestra una mayor variabilidad del índice de poros (entre 0,30 y 0,51 con una desviación de hasta un 8%) que las medidas realizadas con el densímetro nuclear en la misma arena (entre 0,35 y 0,41 con una desviación típica de sólo un 1%).

En la comparación del método de los testigos de acero con el densímetro nuclear, ambos ofrecen una desviación típica prácticamente despreciable en las medidas repetidas por triplicado en las mismas zonas. No obstante, los testigos de acero muestran valores del índice de poros superiores a los obtenidos con el densímetro (con una diferencia relativa media del 14,3%).

Como resultado del análisis de todos los ensayos, se decidió utilizar el método del densímetro nuclear para la toma de datos debido a los siguientes motivos:

- ✓ Se trata de una técnica precisa y fiable y su metodología cumple con lo estipulado en la norma estandarizada para el cálculo de la densidad aparente de suelos (ASTM D6938, 2010).
- ✓ Permite la obtención inmediata in situ de datos de densidad y humedad sin tener que recurrir a métodos de intervención física, tales como los cores de PVC, las probetas o los testigos. Requiere una menor intervención del operario, por lo que se evita alterar la muestra en su acopio, traslado y posterior análisis en laboratorio. A mayor manipulación, mayor riesgo de alteración (Dickinson y Ward, 1994; Gotthard, 1997, Roberts et al. 1998). Este hecho es muy importante, puesto que la alteración de la estructura interna del sedimento en su cata y traslado al laboratorio

puede suponer una compactación de los granos que supongan una reducción de la porosidad primaria, resultando en medidas erróneas (Chuhan et al., 2002).

- ✓ Mayor maniobrabilidad y comodidad (Roberts et al., 1998).
- ✓ Se trata de una técnica no destructiva del lecho costero, pudiéndose repetir reiterativamente la misma medida en el mismo punto (ASTM D6938, 2010).
- ✓ Permite estimar el porcentaje de compactación a través de los ensayos Proctor modificado realizados en la misma arena (UNE 103-501, 1994 y ASTM D1557, 2012).

7.4. Resumen de resultados.

La técnica del densímetro nuclear se ha utilizado para el estudio de la variabilidad de la porosidad de la arena en diferentes plazos en varias playas de la vertiente atlántica de la provincia de Cádiz (Victoria, Camposoto, La Ballena y La Fontanilla) y la vertiente mediterránea (Atunara). Las playas presentan rasgos diferenciados en cuanto a la granulometría, rango de marea, pendiente, exposición al oleaje, presencia de infraestructuras, etc. En cada playa se establecieron perfiles transversales en los que se tomaron muestras en la zona emergida de la playa (A), en la zona media del estrán o intermareal (M) y en la zona más próxima a la bajamar media (B).

Los resultados granulométricos de las arenas nativas de las playas situadas en la vertiente atlántica de la provincia de Cádiz han revelado un tamaño medio de grano de la muestra maestra entre 0,24 mm y 0,34 mm (arenas medias moderadamente clasificadas). Dichas playas se regeneraron con arenas medias moderadamente clasificadas de procedencia marina (Placer de Meca y Puerto de Conil), excepto la playa de La Ballena que se regeneró con arenas medio-gruesas pobremente clasificadas, de cantera terrestre. La arena nativa de la playa situada en la vertiente mediterránea ha mostrado un tamaño medio de grano de la muestra maestra de 0,59 mm (arenas medio-gruesas pobremente clasificadas) y se regeneró con arenas medias (D_{50} = 0,37 mm) procedentes del colindante Puerto de La Atunara (ANEXO I).

De forma general, el tamaño medio de grano creció significativamente en casi todas las playas tras el vertido de arenas de préstamo más gruesas, exceptuando las playas de La Ballena y La Atunara que se alimentaron con arenas más finas. La tendencia generalizada

para todos los casos ha sido una disminución a largo plazo del tamaño de grano hacia valores similares a los nativos.

En cuanto a la porosidad registrada en todas las playas estudiadas, se ha obtenido una variabilidad máxima comprendida entre un 25,6% y un 45%, con una diferencia relativa máxima superior al 43%. Las mayores diferencias se han registrado especialmente, al igual que en el caso de la granulometría, justo tras el vertido de la arena. Concretamente, en los casos de las playas Victoria, Camposoto, Ballena, Fontanilla y Atunara se encontraron incrementos de porosidad de +11,6%, +32,5%, +31,3%, +5,9% y +36,2% respectivamente.

El estudio realizado tras el paso de la primera marea (entre 12 y 24 horas) en las playas Victoria y Camposoto continuó mostrando diferencias relativas de porosidad ascendentes, aunque de menor intensidad (+8,8% y +5,6% respectivamente).

El efecto diario de las mareas y especialmente el estudio realizado tras el paso de las mareas vivas equinocciales resultaron en un cambio de tendencia, disminuyendo la porosidad a medio plazo hasta un -12,5% y un -18,9% en ambas playas. En el resto de playas también se apreciaron descensos significativos debidos principalmente a la influencia de las mareas y el oleaje de la época estival que provocó descensos importantes de la porosidad, excepto en la playa Atunara donde se registró un gran aumento de la porosidad de hasta el +34,9%. Este ascenso se registró poco después de un temporal con una altura de ola significante en torno a 4 metros. No obstante, en el resto de playas no se ha detectado una relación clara entre la variabilidad de la porosidad y el efecto de los temporales.

A largo plazo, aproximadamente 8 meses tras el vertido de arena, se registraron en todas las playas tendencias decrecientes de la porosidad hasta alcanzar niveles próximos a los que tenía la arena nativa, excepto en la playa de La Ballena donde no se llegó a registrar dicha tendencia en el periodo de estudio realizado. En la Tabla 5.21, se presenta un resumen de las principales variaciones registradas en la porosidad de la arena en todas las playas estudiadas debido a la regeneración y a las posteriores influencias marinas en diferentes plazos.

Tabla 5.21. Diferencias relativas máximas de la variabilidad de la porosidad en diferentes plazos en las playas Victoria, Camposoto, Ballena, Fontanilla y Atunara.

	Tras el vertido	Corto plazo (12-24h)	Medio plazo (días)	Medio plazo (meses)	Largo plazo (1-3 años)
Victoria	+11,6%	+8,8%	-3,2%	-12,5%	-10,0%
Camposoto	+32,5%	+5,6%	-6,0%	-18,9%	-10,7%
Ballena	+31,3%		-14,4%		
Fontanilla	+5,9%		+13,0%		-4,0%
Atunara	+36,2%		+34,9%		-33,0%

Tanto la evolución del tamaño medio de grano como la porosidad parecen haber seguido un comportamiento similar. En las playas que fueron realimentadas con arenas más gruesas se observó un aumento de ambos parámetros justo tras el vertido de arena. Asimismo, en todas las playas se ha podido apreciar una tendencia decreciente de ambos parámetros a largo plazo hasta recuperar valores similares a los naturales.

7.5. Publicaciones derivadas.

Los hallazgos derivados a lo largo de esta Tesis ha permitido la publicación de varios artículos incluidos en el SCIndex.

La necesidad de caracterizar el sedimento apto para una regeneración de playa, condujo a estudiar la arena desde el dragado en la zona de préstamo (normalmente submarina) hasta su posterior vertido en la zona nativa (playa). El impacto provocado por las regeneraciones de playa ha servido para conocer la evolución del tamaño de grano y su comportamiento en ambas zonas, resultando en la publicación:

- ✓ *Turbidity and other effects resulting from Trafalgar sandbank dredging and Palmar beach nourishment* (2011). Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 137 (6), 332-343. American Society of Civil Engineers.

Paralelamente al estudio de la porosidad se ha desarrollado una metodología para la optimización del tiempo de tamizado en los análisis granulométricos, divulgándose los hallazgos en la siguiente publicación:

- ✓ *Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands* (2013). Sedimentology, 60 (6), 1357-1558.

Tras el desarrollo metodológico descrito en esta Memoria, se han obtenido unos resultados y conclusiones, los cuales han sido recientemente publicados en:

- ✓ *Beach nourishment effects on sand porosity variability* (2014) Coastal Engineering, 83, 221-232.

Asimismo, a lo largo del desarrollo de esta Tesis, se han ido realizando diversas aportaciones científicas en diferentes Congresos. Por orden cronológico han sido:

- ✓ *Determinación de los impactos provocados por el dragado del Placer de Meca y la regeneración de la playa de El Palmar, TM de Vejer de la Frontera (Cadiz)* (2010). Ponencia. Asociación Técnica de Puertos y Costas, COTEMA. Madrid.
- ✓ *Comparación de la turbidez natural del Placer de Meca frente a la generada por un dragado* (2010). X Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Santander. Págs. 513-521. ISBN: 978-84-86116-11-8
- ✓ *Actuaciones de realimentación, conservación y obras de emergencia en el litoral gaditano: aspectos técnicos, medioambientales y sociales* (2012). XI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Las Palmas de Gran Canaria. Págs. 87-93. ISBN-13:978-84-695-3707-7.
- ✓ *Seguimiento hidrológico espacio-temporal de la pluma de turbidez causada durante un dragado off-shore* (2012). XI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Las Palmas de Gran Canaria. Págs. 87-93. ISBN-13:978-84-695-3707-7.
- ✓ *Estimación del tiempo mínimo de tamizado en análisis granulométricos de arenas medias litorales* (2013). XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos. Cartagena. En prensa.
- ✓ *Optimización de las regeneraciones de playa mediante el estudio de la variación de la densidad de la arena* (2013). VII Jornadas de Geomorfología Litoral. Oviedo. Geo-Temas, 14. ISSN:1576-5172

Las publicaciones más relevantes pueden consultarse en el ANEXO IV.

7.6. Conclusiones.

La presente Tesis Doctoral ha comprendido finalmente un plazo de investigación que abarca desde el año 2008, en el que se comenzó la búsqueda biblográfica y se comenzaron a realizar los primeros ensayos, hasta el 2013, año de redacción de la memoria. A lo largo de este plazo se han utilizado y analizado varias técnicas para la estimación de la porosidad de arenas de diferentes playas de la provincia de Cádiz, en un mayor o menor porcentaje de fiabilidad.

En esta investigación se ha demostrado que es posible medir de forma fiable y precisa la densidad y porosidad de un volumen de arena de playa mediante el uso de un densímetro nuclear y la formulación desarrollada. Desde un punto de vista técnico y económico, es una metodología normalizada por la ASTM D6938 (2010) siendo una técnica rápida, barata y no destructiva del suelo. Este método ha permitido el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la porosidad de la arena de una playa tras una regeneración de playa y la posterior influencia marina.

El ensayo Proctor modificado realizado sobre las arenas nativas y las de préstamo ha permitido la comparación de su máxima capacidad de compresión frente a un mismo nivel energético incidente. Esta comparación representa un factor importante en el conocimiento de la variabilidad de la porosidad, ofreciendo cierta predicción de su evolución debido a la mezcla de ambas arenas. Los resultados de los ensayos realizados en la arena de todas las playas a lo largo de las campañas han ofrecido en todo momento valores coherentes con la densidad medida in situ por el densímetro nuclear.

Tanto el método del densímetro nuclear como el ensayo Proctor modificado pueden ser considerados como herramientas de soporte a la ingeniería de costas para el entendimiento y seguimiento de los cambios volumétricos de arena tras una regeneración.

La metodología de medición del densímetro nuclear y la formulación descrita para el cálculo de la porosidad muestran una alta precisión en las mediciones, con desviaciones típicas inferiores al 0,01% y diferencias relativas máximas en las medidas de densidad y porosidad del orden del 1% y 2%, respectivamente.

La máxima variabilidad de la porosidad de todas las arenas estudiadas se ha registrado entre el 25.6% y el 45%, con máximas diferencias relativas y acumuladas en torno al ±40% a lo largo de las diferentes campañas tras la regeneración de las playas. Estos hallazgos han revelado que la porosidad asumida comúnmente por otros autores del 40%

para arenas medias naturales no cohesivas, debe considerarse sólo como una mera aproximación.

En todas las playas estudiadas se observó un incremento muy significante en la porosidad tras el vertido masivo de arena, con una diferencia relativa máxima de +36,2%. El efecto del primer ciclo de marea (entre 12 y 24 horas tras el vertido) tuvo un efecto leve sobre la porosidad de la arena. Sin embargo, el efecto acumulativo de las mareas diarias y especialmente las mareas vivas equinocciales exhibieron pérdidas relativas de porosidad de hasta un -18,9%.

A largo plazo, la porosidad de la arena decreció en líneas generales con el tiempo, con cierta tendencia a recuperar los niveles de porosidad nativa, aproximadamente 8 meses después del vertido.

Los temporales acontecidos durante el periodo de estudio no parecieron reflejar una influencia significativa en la variabilidad de la porosidad, aunque tampoco se ha observado una clara relación entre el oleaje de fuertes temporales y los cambios en la porosidad, por lo que el efecto de los temporales debería estudiarse más detalladamente en futuras investigaciones.

Los valores de porosidad obtenidos a partir de la metodología descrita son consistentes y perfectamente comparables con otros datos publicados por otros autores. En este sentido, la literatura consultada sostiene la variabilidad exhibida en las playas estudiadas.

La metodología desarrollada para el análisis granulométrico de la arena de playa ha mostrado errores prácticamente insignificantes. Se ha comprobado que un tiempo de 10 minutos de tamizado es suficiente para obtener resultados fiables, revelando que otras sugerencias previas (Syvitski, 1991 y USACE, 2002) que sugieren tiempos mayores pueden ser consideradas como guías básicas (Román-Sierra et al., 2013). La caracterización granulométrica y estadística de las arenas de playa desarrollada paralelamente a las campañas de densidad, se ha mostrado como un factor fundamental para una mayor comprensión de las tendencias y variabilidad de la porosidad de la arena tras una regeneración de playa.

Aunque la porosidad dependa de varios factores (USACE, 2002), en esta investigación se ha podido observar una relación directa entre la porosidad y el tamaño medio de grano a lo largo de todo el periodo de estudio, teniendo un comportamiento similar: Aumento considerable tras el vertido de arena, con una tendencia general decreciente hasta recuperar niveles similares a los de la arena nativa.

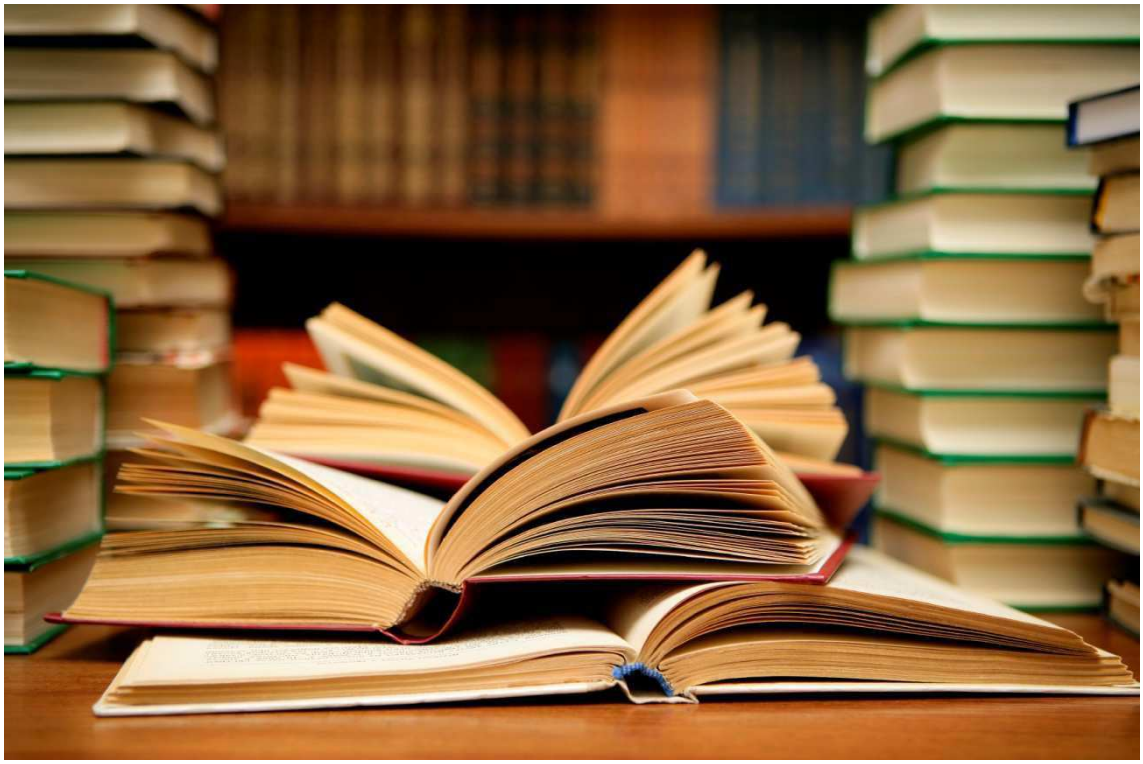
7.7. Nuevas líneas de investigación.

Además de los parámetros estudiados en esta investigación, como futuras líneas de investigación se propone determinar la relación entre la variación de la porosidad de la arena y los cambios topográficos del perfil transversal y longitudinal como respuesta a la influencia de temporales de gran intensidad.

Asimismo, existen otros aspectos que podrían analizarse de forma complementaria al densímetro nuclear con el fin de conocer detalladamente la génesis y evolución de la porosidad de la arena de una playa tras su regeneración y frente a la acción de los temporales. Sería interesante estudiar factores como la morfología de los granos (angularidad y redondez), su granulometría (D_{50}, *sorting*, *skewness* y *kurtosis*), así como estudios de dinámica litoral (transporte de sedimentos, velocidad de caída de los granos, etc.). Estos aspectos pueden influir en la disposición de la estructura granular y por tanto en la densidad aparente, porosidad y permeabilidad del sedimento. Con ello se propondría además un estudio previo de la composición mineralógica de la arena de cada playa a estudiar y medir su densidad real con el picnómetro de gas. La densidad real del sedimento de cada playa sería de aplicación en la formulación para el cálculo de la porosidad, ya descrita en la metodología de esta Tesis.

Otra posible línea de investigación adicional a la anterior sería el seguimiento de la variabilidad de la porosidad de la arena presente en las zonas completamente emergidas de las playas (*backshore*) y su relación con la porosidad de cordones dunares asociados a la línea de costa. Este ámbito no está normalmente afectado por la acción marina, pero sí por otros factores no contemplados en esta investigación como la removilización de la arena por el viento y el tránsito de personas.

CAPÍTULO OCTAVO



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboitiz, A., Tejedor, B., Munoz, J.J., Abarca, J.M., 2008. Relation between daily variations in sea level and meteorological forcing in Sancti Petri Channel (SW Spain). Cienc. Mar. 34, 491-501.

AEMET, 2013. Agencia estatal de meteorología. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España. www.aemet.es.

AENOR, 2013. Asociación Española de Normalización y Certificación. www.aenor.es

Al-Shuely, W.M., Ibrahim, Z.Z., Sulaiman, W.N., Yaziz, M.I., 2010. Characterization of beach sedimentary environments in the Batinah region, Oman. Journal of Environmental Science and Technology 3, 89-100.

Anfuso, G., 2005. Sediment-activation depth values for gentle and steep beaches. Mar. Geol. 220, 101-112.

Anfuso, G., Benavente, J., Gracia, F.J., 2001. Morphodynamic responses of nourished beaches in SW Spain. Journal of Coastal Conservation 7, 71-80.

Anfuso, G., Domínguez, L., Gracia, F.J., 2007. Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain. Catena 70, 229-242.

Anfuso, G., Gracia, F.J., 2005. Morphodynamic characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: Implications for coastal erosion management. J. Coast. Res. 21, 1139-1153.

Anfuso, G., Gracia, F.J., Andrés, J., Sánchez, F., Del Río, L., López-Aguayo, F., 2000. Depth of disturbance in mesotidal beaches during a single tidal cycle. J. Coast. Res. 16, 446-457.

Anfuso, G., Gracia, F.J., Martinez, J.A., del Rio, L., Andres, J., Sanchez, F., Lopez-Aguayo, F., 1999. Modelling the morphologic behaviour of beaches by studying variations in disturbance depth. Estudios Geologicos 55, 113-125.

Arulanandan, K., 1991. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil. J. Geotech. Eng. 117, 319-330.

Athy, L.F., 1930. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. AAPG Bull. 14, 1-24.

ASTM D1556, 2007. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D1556-07.

ASTM D1557, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)). ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D1557-12.

ASTM D2216, 2010. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D2216-10.

ASTM D5550, 2006. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D5550-06.

ASTM D6938, 2010. Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D6938-10.

ASTM D7013/D7013M, 2011 Standard Guide for Calibration Facility Setup for Nuclear Surface Gauges. ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D7013_D7013M-11.

Atkins, J.E., McBride, E.F., 1992. Porosity and packing of Holocene river, dune, and beach sands. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 76, 339-355.

Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C., Cunha, T., Dias, J., 2008. Monitoring sandy shores morphologies by DGPS - A practical tool to generate digital elevation models. J. Coast. Res. 24, 1516-1528.

Barbanti, A., Bothner, M.H., 1993. A procedure for partitioning bulk sediments into distinct grain-size fractions for geochemical analysis. Environ. Geol. 21, 3-13.

Barragán, J.M., 2003. Medio Ambiente y Desarrollo En Áreas Litorales: Introducción a La Planificación y Gestión Integradas.

Beard, D.C., Weyl, P.K., 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 57, 349-369.

Benavente, J., Del Río, L., Anfuso, G., Gracia, F., Reyes, J., 2002. Utility of morphodynamic characterisation in the prediction of beach damage by storms. Journal of Coastal Research SI 36, 56-64.

Benavente, J., Gracia, F.-., Anfuso, G., Lopez-Aguayo, F., 2005. Temporal assessment of sediment transport from beach nourishments by using foraminifera as natural tracers. Coast. Eng. 52, 205-219.

Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., Froyen, L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: Comparison with the sieve-pipette method. Catena 32, 193-208.

Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. American Society of Agronomy, Inc. University of Minnesota St. Paul, Minnesota.

Bloom, M., Russell, M.J., Kustau, A., Mandayam, S., Sukumaran, B., 2010. Measurement of porosity in granular particle distributions using adaptive thresholding. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 59, 1192-1199.

Blott, S.J., Pye, K., 2001. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surf. Process. Landforms 26, 1237-1248.

Blott, S.J., Pye, K., 2008. Particle shape: A review and new methods of characterization and classification. Sedimentology 55, 31-63.

Blott, S.J., Pye, K., 2012. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. Sedimentology 59, 2071-2096.

Bouwer, H., 1961. A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in situ above a water table. Soil Sci. Soc. Am. J. 25, 334-339.

Bouwer, H., 1962. Field determination of hydraulic conductivity above a water table with the double-tube method. Soil Sci. Soc. Am. J. 26, 330-335.

Breslau, L.R., 1967. The normally-incident reflectivity of the sea floor at 12KC and its correlation with physical and geological properties of naturally-occurring sediments. Technical Report Reference No. 67-16. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts.

Briggs, K.B., 1994. High-frequency acoustic scattering from sediment interface roughness and volume inhomogeneities. Dissertation, University of Miami, Coral Gables, Florida.

Briggs, K.B., Reed, A.H., Jackson, D.R., Tang, D., 2010. Fine-scale volume heterogeneity in a mixed sand/mud sediment off Fort Walton Beach, FL. IEEE J. Ocean. Eng. 35, 471-487.

CEDEX, 1994. Recomendaciones para la gestión del material dragado en los puertos españoles. Centro de Estudios y Experimentaciones de Obras Públicas. Gobierno de España. Puertos del Estado. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 45 páginas.

CEDEX, 2008. La picnometría de Helio. Fundamentos físicos, normativa, descripción del equipoy procedimiento experimental. Centro de Estudios y Experimentaciones de Obras Públicas. Gobierno de España. Puertos del Estado. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Chen, Y., Dougherty, E.R., 1994. Gray-scale morphological granulometric texture classification. Optical Engineering 33, 2713-2722.

Chuhan, F.A., Kjeldstad, A., Bjørlykke, K., Høeg, K., 2002. Porosity loss in sand by grain crushing - Experimental evidence and relevance to reservoir quality. Mar. Pet. Geol. 19, 39-53.

Chuhan, F.A., Kjeldstad, A., Bjørlykke, K., Høeg, K., 2003. Experimental compression of loose sands: Relevance to porosity reduction during burial in sedimentary basins. Canadian Geotechnical Journal 40, 995-1011.

Ciavola, P., Dias, N., Ferreira, O., Taborda, R., Dias, J., 1998. Fluorescent sands for measurements of longshore transport rates: a case study from Praia de Faro in southern Portugal. Geo-Mar. Lett. 18, 49-57.

Comisión Europea, 2009. The economics of climate change adaptation in EU coastal areas. Final Report. Policy Research Corporation (in association with MRAG). European Commission. Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries. ISBN 978-92-79-12065-7.

CUR, 1987. Manual on artificial beach nourishment. Centre for civil engineering research, codes and specifications. 130, Rijkswaterstaat - Delft Hydraulics, The Nederlands.

Curry, C.W., Bennett, R.H., Hulbert, M.H., Curry, K.J., Faas, R.W., 2004. Comparative study of sand porosity and a technique for determing porosity of undisturbed marine sediment. Marine Georesources and Geotechnology 22, 231-252.

Davies, J.L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. Zeitschrift für Geomorphologie, Mortensen Sonderheft, 8, 127–142.

Dean, R.G., 2003. Beach nourishment: theory and practice. Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific Publishing Company, River Edge, New Jersey. 399 páginas.

Del Río, L. y Gracia, F.J., 2007. Análisis de la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz ante la erosión costera. Revista C&G 21(1-2), 87-101.

Dickinson, W.W., Ward, J.D., 1994. Low depositional porosity in eolian sands and sandstones, Namib Desert. Journal of Sedimentary Research A: Sedimentary Petrology & Processes 64 A, 226-232.

Diputación de Cádiz, 2013. Diputación provincial de Cádiz. www.dipucadiz.es

Emery, K.O., 1945. Entrapment of air in beach sand. Journal of Sedimentary, 15, 39-49.

Erchul, R.A., Nacci, V.A., 1972. Electrical Resistivity Measuring System for Porosity Determination of Marine Sediments. Mar. Technol. Soc. J. 6, 47-&.

Eurosion, 2004. Living with Coastal Erosion in Europe–Sediment and Space for Sustainability. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities , 1-40.

Eurostat, 2009. Nearly half of the population of EU countries with a sea border is located in coastal regions. Statistics in Focus 47/2009. European Commission, 12 pp. ISSN 1977-0316.

Faas, R.W., 2001. Report on research concerning sediment porosity. University of Southern Mississippi, Stennis Space Center, MS 39529.

Ferreira, O., Ciavola, P., Taborda, R., Bairros, M., Dias, J.A., 2000. Sediment mixing depth determination for steep gentle foreshores. J. Coast. Res. 16, 830-839.

Folk, R. L., 1974. Petrology of Sedimentary Rock, Hemphill Publishing Company, Austin, TX.

Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Research 27, 3-26.

Fraser, H.J., 1935. Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. J. Geol. 43, 910-1010.

Friedman, G.M., Sanders, J.E., 1978. Principles of sedimentology. New York, John Wiley & Sons, 792 p.

Gaither, A., 1953. A study of porosity and grain relationships in experimental sands. Journal of Sedimentary Research 23, 180-195.

Galofre, J., Montoya, F.J., Medina, R., 1997. Beach nourishment in Altafulla, Spain: Verification of theoretical models. Proceedings of the Coastal Engineering Conference 4, 4730-4743.

Galvin, C.J., 1979. Relation between immersed weight and volume rates of longshore transport. US Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Va., Technical Paper 79.

Gómez-Pina, G., Fages, L., Ramírez, J.L., Muñoz-Pérez, J.J., Enríquez, J., 2006. A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. Proceedings of the Coastal Engineering Conference , 4167-4178.

Gómez-Pina, G., Muñoz-Ṕerez, J.J., Ramírez, J.L., Ley, C., 2002. Sand dune management problems and techniques, Spain. Journal of Coastal Research , 325-332.

Gotthard, D., 1997. Three-dimensional, non-destructive measurements of sediment bulk density using gamma attenuation. Rep., Dept.of Mech.and Envir.Engrg., University of California, Santa Barbara, CA .

Graton, L.C., Fraser, H.J., 1935. Systematic packing of spheres-with particular relation to porosity and permeability. J. Geol. 43, 785-909.

Gutiérrez-Más, J.M., 1991. Introducción a La Geología De La Provincia De Cádiz. Servicio de Publicaciones, Universidad de Cádiz. 315 páginas.

Gutiérrez-Mas, J., Hernández-Molina, F., López-Aguayo, F., 1993. Evolución de la dinámica sedimentaria reciente en la plataforma continental septentrional del Golfo de Cádiz. Geogaceta 14, 32-35.

Gutiérrez-Más, J., López-Galindo, A., Bella, S.D., 1994. Geoquímica de los sedimentos recientes de la plataforma continental y bahía de Cádiz (SW de España). Rev.Soc.Geol.España 7, 1-2.

Gutiérrez-Más, J.M., Moral, J.P., Sánchez, A., Dominguez, S., Muñoz-Perez, J.J., 2003. Multicycle sediments on the continental shelf of Cadiz (SW Spain). Estuar. Coast. Shelf Sci., 57(4), 667–677.

Hamilton, E.L., Bachman, R.T., 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. Journal, Acoustical Society of America 72, 1891-1904.

Hamilton, E.L., Menard, H.W., 1956. Density and porosity of sea-floor surface sediments off San Diego, California. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 40, 754–761.

Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., Stive, M.J.F., 2002. A summary of European experience with shore nourishment. Coast. Eng. 47, 237-264.

Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., Spanhoff, R., 2002. Beach nourishment projects, practices, and objectives - A European overview. Coast. Eng. 47, 81-111.

Horowitz, I.L., 1976. Contemporary Earth Science. Amsco School Pubns Inc.

IGN, 2013. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. www.ign.es

IHM, 2013. Instituto Hidrográfico de la Marina. Armada Española. Ministerio de Defensa. Gobierno de España. www.armada.mde.es

Jackson, P.D., 1975. Electrical resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sands. Mar. Geotechnol. 1, 91-115.

Jackson, P.D., Smith, D.T., Stanford, P.N., 1978. Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands. Geophysics 43, 1250-1268.

James, R.J., 2000. From beaches to beach environments: Linking the ecology, human-use and management of beaches in Australia. Ocean and Coastal Management 43, 495-514.

Jódar, J.M., Muñoz-Perez, J.J., Gutiérrez-Mas, J.M., 2000. Evolución de la acomodación de la arena tras la regeneración de la playa de Santa María del Mar (Cádiz).

Junta de Andalucía, 2013. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo. http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/sima/smind11.htm

Kakinoki, T., Tsujjimoto, G., Yamada, F., Sakai, D., Uno, K., 2011. Beach profile and sediment characteristics of a mixed sand beach under diurnal sea level variations. J. Coast. Res. , 765-770.

Kamphuis, J.W., Davies, M.H., Nairn, R.B., Sayao, O.J., 1986. Calculation of littoral sand transport rate. Coast. Eng. 10, 1-21.

Kang, H., Nielsen, P., Hanslow, D.J., 1995. Watertable overheight due to wave runup on a sandy beach. Proceedings of the Coastal Engineering Conference 2, 2115-2124.

Kim, J.H., Yoon, H.-., Lee, J.-., 2010. Void ratio estimation of soft soils using electrical resistivity cone probe. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 137, 86-93.

King, F.H., Slichter, C.S., 1899. Principles and Conditions of the Movements of Ground Water. Govt. Prtg. Off.

Kolbuszewski, J.J., 1948. An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands. Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam 1, 158–165.

Krumbein, W. C., 1936. "Application of Logarithmic Moments to Size Frequency Distribution of Sediments," Journal of Sedimentary Petrology, Vol 6, 35-47.

Landry, C.E., Keeler, A.G., Kriesel, W., 2003. An economic evaluation of beach erosion management alternatives. Mar. Resour. Econ. 18, 105-128.

Lanesky, D.E., Logan, B.W., Brown, R.G., Hine, A.C., 1979. A new approach to portable vibra coring underwater and on land. J. Sediment. Petrol. 49, 654-657.

Larson, R., Morang, A., Gorman, L., 1997. Monitoring the coastal environment; Part II: Sediment sampling and geotechnical methods. J. Coast. Res. 13, 308-330.

Ley de Costas, 1988. Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas. BOE 181, de 29 de julio de 1988, páginas 23386-23401.

Ludwick, J.C., 1956. A volumeter for measuring porosity of incoherent sands. J. Sediment. Petrol. 26, 276–283.

Lundegard, P.D., 1992. Sandstone porosity loss - a "big picture' view of the importance of compaction. J. Sediment. Petrol. 62, 250-260.

Martin, C.S., 1970. Effect of a porous sand bed on incipient sediment motion. Water Resour. Res. 6, 1162-1174.

Martin, C.S., Aral, M.M., 1971. Seepage force on interfacial bed particles. Journal of the Hydraulics Division 97, 1081-1100.

Matheron, G., 1975. Random Sets and Integral Geometry. Wiley, New York, 261 páginas.

Masselink, G., Short, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. J. Coast. Res. 9, 785-800.

McLachlan, A., Turner, I., 1994. The interstitial environment of sandy beaches. Mar. Ecol. 15, 177-211.

Medina, R., Losada, M.A., Losada, I.J., Vidal, C., 1994. Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. Mar. Geol. 118, 195-206.

MMA, 1998. Estudio de la evolución del comportamiento mecánico de los sedimentos, después de la regeneración de la playa de Camposoto, T.M. San Fernando, Cádiz. Demarcación de Costas Andalucía-Atlántico. Ministerio de Medio Ambiente.

Montoya, I., Rodriguez, I., Sanchez, M.J., Carreno, F., 2010. Geohazards and Geographic Information in the Coast of Tarragona (Spain). Coastal and Marine Geospatial Technologies 13, 371-377.

Mosquera, M.J., De Los Santos, D.M., Rivas, T., 2010. Surfactant-synthesized ormosils with application to stone restoration. Langmuir 26, 6737-6745.

Mosquera, M.J., Pozo, J., Esquivias, L., Rivas, T., Silva, B., 2002. Application of mercury porosimetry to the study of xerogels used as stone consolidants. J. Non Cryst. Solids 311, 185-194.

Muñoz-Perez, J.J., 1996. Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas , 150 pp.

Muñoz-Perez, J.J., 2002. Morphodynamic responses of nourished beaches in SW Spain: A reply to Anfuso et al. Journal of Coastal Conservation 8, 189-190.

Muñoz-Perez, J.J., 2008. Artificial reefs to improve and protect fishing grounds. Recent Patents on Engineering 2, 80-86.

Muñoz-Perez, J.J., Abarca-Molina, J.M., 2009. Effect of wind and atmospheric pressure variations on the mean sea level of salt marshes and estuaries. Rev Obras Publicas 156, 21-32.

Muñoz-Perez, J., Enriquez, J., 1998. Dinámica litoral de una unidad fisiográfica completa: Sanlúcar-Rota. Revista de Obras Publicas , 35-44.

Muñoz-Perez, J.J., Gómez-Pina, G., 2010. Comment on Avila-Serrano et al. "Sediment variations and littoral transport at La Victoria Beach, Cádiz, Spain". Cienc. Mar. 36, 99-104.

Munoz-Perez, J.J., Gomez-Pina, G., Moreno, L., 2007. Discussion of: Anfuso, G. and Gracia, F.J., 2005. Morphodynamic characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: Implications for coastal erosion management. Journal of Coastal Research, 21(6), 1139-1153. J. Coast. Res. 23, 275-276.

Muñoz-Perez, J. J., Gutiérrez-Mas, J. M., Moreno, J., Español, L., Moreno, L., Bernabeu, A., 2003. Portable meter system for dry weight control in dredging hoppers." J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 129(2), 79–85.

Muñoz-Perez, J.J., Gutiérrez-Más, J.M., 1999. Tipologia y eficacia de los espigones de escollera construidos para la mejora de la estabilidad de las playas del litoral atlantico de la provincia de Cadiz.

Muñoz Perez, J.J., López De San Román Blanco, B., Gutiérrez Más, J.M., Cuenca López, G.J., 2000. La regeneración de playas en el Golfo de Cádiz. Un coste asumible y sostenible. Rev Obras Publicas 147, 23-28.

Muñoz-Perez, J.J., López De San Roman-Blanco, B., Gutiérrez-Más, J.M., Moreno, L., Cuenca, G.J., 2001. Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). Coast. Eng. 42, 143-153.

Muñoz-Perez, J.J., Medina, R., 2000. Profile changes due to a fortnightly tidal cycle. Coastal Engineering 2000 - Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, ICCE 2000 276, X3062-3075.

Muñoz-Perez, J.J., Medina, R., 2010. Comparison of long-, medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. Coast. Eng. 57, 241-251.

Muñoz-Perez, J.J., Payo, A., Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Moreno, L., 2012. Optimization of beach profile spacing: An applicable tool for coastal monitoring. Scientia Marina 76, 791-798.

Muñoz-Perez, J.J., Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Neves, G., Del Campo, J.M., 2013. Comments on "Confirmation of Beach Accretion by Grain-Size Trend Analysis: Camposoto Beach, Cadiz, SW Spain" by Poizot, Anfuso, Mear, and Bellido. Geo-Marine Letters. DOI 10.1007/s00367-013-0344-0.

Navarro-Pons, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Tsoar, H., Rodríguez, I., Gómez-Pina, G., 2011. Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. Geomorphology 129, 14-28.

Navarro-Pons, M., Román-Sierra, J., Caballero, I., Muñoz-Perez, J., Gómez-Pina, G., Fages, L., 2010. La importancia del estudio espacio-temporal para la gestión sostenible de las dunas móviles. , pp. 493-502.

Negro-Valdecantos, V. N., 1990. La variabilidad de los perfiles de playa. Modelo de las envolventes para equilibrio morfodinámico en perfil transversal (tercera parte). Revista de Obras Públicas: Organo profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos, (3292), 35-40.

Negro-Valdecantos, V.N., 2002. Diseño de diques rompeolas: conceptos generales, comportamiento estructural y funcional, proceso constructivo. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. ISBN 84-380-0216-1.

Nielsen, P., Robert, S., Møller-Christiansen, B., Oliva, P., 2001. Infiltration effects on sediment mobility under waves. Coast. Eng. 42, 105-114.

Packwood, A.R., 1983. The influence of beach porosity on wave uprush and backwash. Coast. Eng. 7, 29-40.

Payo, A., Baquerizo, A., Losada, M., 2008. Uncertainty assessment: Application to the shoreline. Journal of hydraulic research 46, 96-104.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstone. Springer. Verlag New York Inc.

Pinho, L., Elhaddad, F., Facio, D.S., Mosquera, M.J., 2013. A novel TiO2-SiO2 nanocomposite converts a very friable stone into a self-cleaning building material. Appl. Surf. Sci. 275, 389-396.

Poizot, E., Anfuso, G., Méar, Y., Bellido, C., 2013. Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain. Geo-Mar. Lett. , 1-10.

Porta, J., Lopez-Acevedo, P., de Laburu, C.R., 2003. Edafología para la Agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid, España .

Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. Journal of Sedimentary Research, 23, 117-119.

Puertos del Estado, 2013. Banco de datos de oceanografía y meteorología. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. www.puertos.es

Pryor, W.A., 1973. Permeability-Porosity Patterns and Variations in some Holocene Sand Bodies. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 57, 162-189.

Ramsey, J.S., Orfant, J.R., Burckardt, J.F., 2008. Restoration of an urban beach using a mixed sediment nourishment material. Solutions to Coastal Disasters Congress 2008 - Proceedings of the Solutions to Coastal Disasters Congress 2008 312, 618-629.

Reed, A.H., Thompson, K.E., Briggs, K.B., Willson, C.S., 2010. Physical pore properties and grain interactions of SAX04 sands. IEEE J. Ocean. Eng. 35, 488-501.

Reis, A.H., Gama, C., 2010. Use of sand beds of variable permeability in beach profile engineering. AIP Conference Proceedings 1254, 231-235.

Reyes, J., Benavente, J., Gracia, F., López-Aguayo, F., 1996. Efectos de los temporales sobre las playas de la Bahía de Cádiz. IV Reunión Nacional de Geomorfología , 18-20.

Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D., Lick, W., 1998. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles. J. Hydraul. Eng. 124, 1261-1267.

Roberts, T.M., Wang, P., 2012. Four-year performance and associated controlling factors of several beach nourishment projects along three adjacent barrier islands, west-central Florida, USA. Coast. Eng. 70, 21-39.

Rodriguez, I., Montoya, I., Sánchez, M.J., Carreño, F., 2009. Geographic Information Systems applied to Integrated Coastal Zone Management. Geomorphology 107, 100-105.

Rodriguez, I., Gimeno, A., Carreño, F., 2003. Aplicaciones de los SIG en la gestión integral de zonas costeras. Ejemplo el Delta del Ebro. XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Extremadura.

Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Muñoz-Pérez, J.J., Gómez-Pina, G., Fages Antiñolo, L., 2004. Ecosistemas dunares en la provincia de Cádiz. Estabilizaciones en Bolonia y Valdevaqueros, T.M. Tarifa. Revista de Obras Públicas 151, 3450, 65–76.

Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Muñoz-Perez, J.J., Tejedor, B., 2008. Variabilidad espacio-temporal de la flecha del río Guadiaro. Ingeniería civil , 111-122.

Román-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J., Gomez-Pina, G., 2011. Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering 137, 332-343.

Román-Sierra, J., Muñoz-perez, J.J., Navarro-Pons, M., 2013. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. Sedimentology 60, 1484-1497.

Román-Sierra, J.; Muñoz-Perez, J.J., Navarro-Pons, M., 2014. Beach nourishment effects on sand porosity variability. Coast. Eng. 83, 221-232.

Sánchez-Arcilla, A., Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I., Gracia, V., 2008. Implications of climatic change on Spanish Mediterranean low-lying coasts: The Ebro delta case. J. Coast. Res. 24, 306-316.

Shepard, F.P., 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. Journal of Sedimentary Research 24, 151-158.

Soulsby, R.L., 1991. Dynamics of marine sands. Thomas Telford Publ., London. 249 pp.

Syvitski, J.P.M., 1991. Principles, methods, and application of particle size analysis. Principles, methods, and application of particle size analysis .

Tang, D., Briggs, K., Williams, K., Jackson, D., Thorsos, E., Percival, D., 2002. Fine-scale volume heterogeneity measurements in sand. IEEE J. Ocean. Eng. 27, 546-560.

Tanner, W.F., 1969. The particle size scale. Journal of Sedimentary Research 39, 809-812.

Terzaghi, C., 1925. Principles of soil mechanics: V—Physical differences between sand and clay. Engineering News – Record 95, 912–916.

Tickell, F.G., Hiatt, W.N., 1938. Effect of angularity of grain on porosity and permeability of unconsolidated sands. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 22, 1272–1279.

Trask, P.D., 1931. Compaction of sediments. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 15, 271–276.

Trembanis, A.C., Pilkey, O.H., 1999. Comparison of beach nourishment along the U.S. Atlantic, Great Lakes, Gulf of Mexico New England shorelines. Coast. Manage. 27, 329-340.

Troxler, R.E., Dep, W.H., Eagan, J.T., Jordan, A.W., 2001. Thin layer nuclear density gauge. Troxler electronic laboratories. www.troxlerlabs.com.

UNE 103-300, 1993. Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa. AENOR.

UNE 103-302, 1994. Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo. AENOR.

UNE 103-501, 1994. Ensayo de compactación. Proctor modificado. AENOR.

UNE 103-503, 1995. Determinación "in situ" de la densidad de un suelo por el método de la arena. AENOR.

UNE 7045, 1952. Determinación de la porosidad de un terreno. AENOR.

USACE, 2008. Beach fill design. Coastal sediment properties. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual – Part V – Chapter 4. EM 1110-2-1100.

USACE, 2002. Coastal sediment properties. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual – Part III – Chapter 1. EM 1110-2-1100.

Valladares, M., Benavente, J., y Plomaritis, T.A., 2012. Influencia de la permeabilidad en la recuperación natural de las playas: ejemplos de la costa gaditana. ISMS12 (III International Symposium in Marine Sciences), Cádiz.

Van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. J. Hydraul. Eng. 133, 649-667.

Villalobos, C.A., Garcia Prieto, F.J., Benavente, J., 2009. Evolución histórica de la línea de costa en el sector meridional de la Bahía de Cádiz.

VVAA, 2007. El cambio climatico en España. Informe para el presidente del Gobierno http://aulamedioambiente.uji.es/docs/informepresidente.pdf

Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. J. Geol. 30, 377-392.

Wheatcroft, R.A., 2002. In situ measurements of near-surface porosity in shallow-water marine sands. IEEE J. Ocean. Eng. 27, 561-570.

Work, P. A., Fehrenbacher, F., and Voulgaris, G., 2004. Nearshore impacts of dredging for beach nourishment. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., 130, 303–311.

Zingg, TH., 1935. Beitrag zur Schotteranalyse. Sweiz. Mineralogy. Petrol. Mitt. Bd.15, pp.39-140.

ANEXOS

ANEXO I. RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS.

Datos granulométricos de la playa Victoria

	ESTACIÓN	TAMAÑO MEDIO - D50 (mm)	SORTING (φ)	SKEWNESS (φ)	KURTOSIS (φ)
	Arena préstamo	0,32	0,88	-0,24	0,96
19/08/2010 (29 y 35 días antes de la regeneración de los perfiles 1 y 2 respectivamente)	MAESTRA NATIVA	0,24	0,81	1,58	1,20
	P1 A	0,21	0,50	0,21	0,88
	P1Mberm	-	-	-	-
	P1 M	0,27	0,71	-0,10	0,80
	P1 B	0,31	1,33	4,20	1,07
	P2 A	0,20	0,52	0,39	1,00
	P2 Mberm	0,24	0,59	0,06	1,05
	P2 M	-	-	-	-
	P2 B	0,26	0,83	0,76	1,17
17/09/2010 (P1 recién regenerado y 6 días antes de la regeneración del P2)	MAESTRA	0,23	0,70	1,09	1,17
	P1 A	0,21	0,50	2,25	0,92
	P1Mberm	0,28	1,31	5,21	0,87
	P1 M	0,29	0,46	-1,09	1,14
	P1 B	0,27	0,58	-0,32	0,88
	P2 A	0,22	0,50	0,20	0,86
	P2 Mberm	-	-	-	-
	P2 M	0,29	0,47	-1,07	0,84
	P2 B	0,27	0,58	-0,22	0,83
18/09/2010 (1 día después de la regeneración del P1 y 5 días antes del vertido en el P2)	MAESTRA	0,24	0,95	3,26	1,42
	P1 A	0,20	0,47	0,28	0,81
	P1Mberm	0,29	1,40	5,77	0,79
	P1 M	0,29	0,60	-1,29	1,47
	P1 B	0,27	0,73	0,52	0,99
	P2 A	-	-	-	-
	P2 Mberm	-	-	-	-
	P2 M	-	-	-	-
	P2 B	-	-	-	-
23/09/2010 (6 días después en P1 y P2 recién regenerado)	MAESTRA	0,24	0,89	2,26	1,26
	P1 A	0,26	1,06	3,15	1,22
	P1Mberm	0,24	1,18	5,17	1,45
	P1 M	0,27	0,69	0,03	0,96
	P1 B	0,20	0,95	2,03	1,33
	P2 A	0,24	1,11	4,58	1,61
	P2 Mberm	0,25	1,00	3,67	1,44
	P2 M	0,21	0,48	0,31	0,84
	P2 B	0,26	0,96	0,76	1,12
24/09/2010 (7 y 1 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	MAESTRA	0,27	1,02	2,69	1,15
	P1 A	0,28	1,08	2,68	1,09
	P1Mberm	0,23	0,98	4,09	1,44
	P1 M	0,28	0,74	0,35	1,08
	P1 B	0,30	1,27	3,41	0,92
	P2 A	0,24	1,18	5,46	1,51
	P2 Mberm	0,24	0,82	2,10	1,27
	P2 M	0,24	0,69	0,11	0,99
	P2 B	0,35	1,09	1,77	1,11

08/10/2010 (21 y 15 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	MAESTRA	0,27	1,08	3,79	1,27
	P1 A	0,28	1,08	2,68	1,04
	P1Mberm	0,23	0,88	3,32	1,49
	P1 M	0,28	0,83	1,18	1,26
	P1 B	0,46	1,52	1,78	0,66
	P2 A	0,24	1,18	5,46	1,41
	P2 Mberm	0,23	0,73	1,73	1,27
	P2 M	0,27	0,60	-0,19	0,83
	P2 B	0,35	1,02	1,40	1,65
08/11/2010 (52 y 46 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	MAESTRA	0,26	0,93	2,44	0,94
	P1 A	0,27	1,05	2,99	1,15
	P1Mberm	0,27	0,88	1,96	1,32
	P1 M	0,28	0,75	0,49	0,99
	P1 B	0,29	0,79	0,40	0,90
	P2 A	0,25	1,25	5,72	1,27
	P2 Mberm	0,22	0,68	1,55	1,32
	P2 M	0,26	0,97	2,97	1,40
	P2 B	0,35	0,72	-1,66	0,97
16/05/2011 (241 y 235 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	MAESTRA	0,23	0,95	2,61	1,48
	P1 A	0,23	0,57	0,37	1,09
	P1Mberm	-	-	-	-
	P1 M	0,25	0,59	0,06	0,91
	P1 B	0,44	1,32	1,93	0,66
	P2 A	0,28	1,37	5,72	0,83
	P2 Mberm	0,20	0,45	0,22	0,79
	P2 M	0,19	0,75	0,98	1,39
	P2 B	0,18	0,62	-0,17	1,10
13/12/2011 (452 y 446 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	MAESTRA	0,21	0,61	0,45	1,14
	P1 A	0,19	0,54	0,17	1,12
	P1Mberm	0,19	0,40	0,13	1,08
	P1 M	0,20	0,66	0,28	1,10
	P1 B	0,28	1,02	3,08	1,61
	P2 A	0,19	0,44	0,27	0,97
	P2 Mberm	0,19	0,46	0,20	0,94
	P2 M	0,20	0,51	0,03	0,92
	P2 B	0,25	0,63	-0,52	0,96
12/04/2013 (937 y 931 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	MAESTRA	0,26	0,67	0,25	0,98
	P1 A	0,23	0,54	0,14	0,79
	P1Mberm	0,19	0,42	0,29	0,87
	P1 M	0,28	0,55	-0,60	0,98
	P1 B	0,33	0,82	0,10	1,02
	P2 A	0,22	0,88	3,62	1,57
	P2 Mberm	0,20	0,45	0,22	0,75
	P2 M	0,24	0,55	0,05	0,95
	P2 B	0,32	0,85	0,03	1,10
MAESTRA PERIODO ESTUDIO		**0,24**	**0,85**	**2,09**	**1,33**

Datos granulométricos de la playa de Camposoto

	ESTACIÓN	TAMAÑO MEDIO - D50 (mm)	SORTING (φ)	SKEWNESS (φ)	KURTOSIS (φ)
25/08/2010 (37 y 5 días antes de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	Arena préstamo	0,32	0,88	-0,24	0,96
	MAESTRA	0,27	1,12	4,10	1,32
	P1 A	0,22	0,57	0,41	1,01
	P1 M	0,94	1,31	-3,48	0,63
	P1 B	0,27	0,83	0,89	0,89
	P2 A	0,18	0,44	0,31	0,91
	P2 M	0,33	1,02	2,40	1,47
	P2 B	0,23	0,60	0,44	0,87
03/09/2010 (1 y 4 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	MAESTRA	0,27	1,19	4,24	1,20
	P1 A	0,30	1,52	6,87	0,71
	P1 M	0,23	0,52	0,09	0,82
	P1 B	0,27	0,60	-0,19	0,79
	P2 A	0,44	1,48	2,55	0,64
	P2 M	0,24	1,28	6,65	1,23
	P2 B	0,26	0,72	0,70	1,04
27/09/2010 (25 y 28 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	MAESTRA	0,33	1,27	3,25	0,95
	P1 A	0,26	1,31	5,91	0,91
	P1 M	0,38	0,85	-0,64	0,80
	P1 B	0,60	1,33	1,16	0,83
	P2 A	0,53	1,50	1,30	0,69
	P2 M	0,20	0,48	0,19	0,84
	P2 B	0,35	0,95	1,58	1,59
05/11/2010 (64 y 67 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	MAESTRA	0,33	1,38	4,45	0,79
	P1 A	0,29	1,41	5,81	0,74
	P1 M	0,38	1,55	5,78	0,91
	P1 B	0,58	1,37	1,85	0,89
	P2 A	0,36	1,48	4,38	0,69
	P2 M	0,24	1,18	5,02	1,03
	P2 B	0,27	0,96	2,48	1,26
23/12/2010 (112 y 115 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	MAESTRA	0,32	1,37	4,64	0,70
	P1 A	0,28	1,36	5,67	0,86
	P1 M	0,50	1,48	1,52	0,69
	P1 B	-	-	-	-
	P2 A	0,31	1,44	5,44	0,70
	P2 M	0,29	1,21	3,79	0,89
	P2 B	-	-	-	-
17/05/2011 (257 y 260 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	MAESTRA	0,29	1,33	4,93	0,89
	P1 A	0,42	1,53	3,26	0,63
	P1 M	0,24	0,91	2,72	1,27
	P1 B	0,31	1,03	1,88	1,08
	P2 A	0,71	1,51	-1,46	0,70
	P2 M	0,29	1,17	3,69	1,04
	P2 B	0,19	0,46	0,31	1,05
13/12/2011 (467 y 470 días después del vertido en el P1 y P2,	MAESTRA	0,28	1,08	3,05	1,04
	P1 A	0,23	1,00	4,37	1,48
	P1 M	0,29	0,98	1,99	1,16

respectivamente)	P1 B	0,50	1,37	0,65	0,74
	P2 A	0,32	1,43	5,19	0,78
	P2 M	0,27	0,75	0,62	0,97
	P2 B	0,23	0,57	0,33	0,84
MAESTRA PERIODO ESTUDIO		**0,29**	**1,25**	**4,42**	**0,96**

Datos granulométricos de la playa Ballena

	ESTACIÓN	TAMAÑO MEDIO - D50 (mm)	SORTING (φ)	SKEWNESS (φ)	KURTOSIS (φ)
16/04/2010 (60 días antes de la regeneración de los perfiles)	Arena préstamo	0,49	1,03	0,80	1,14
	MAESTRA	0,34	1,13	3,09	1,68
	P1A	0,28	0,57	-0,40	0,99
	P1M	0,42	1,18	1,61	1,05
	P1B	0,35	1,09	2,08	1,30
	P2A	0,28	0,49	-0,60	0,83
	P2M	0,37	0,44	-0,39	0,99
	P2B	0,30	0,63	-0,26	0,98
	P3A	0,28	0,57	-0,42	1,08
	P3M	1,30	1,33	-6,62	0,61
	P3B	0,45	0,96	0,94	1,17
17/06/2010 (regeneración de los perfiles)	MAESTRA	0,29	0,92	1,25	0,88
	P1A	0,28	1,04	3,64	1,46
	P1M	0,20	0,52	0,35	0,88
	P1B	0,20	0,72	0,34	1,26
	P2A	0,28	0,63	-0,23	0,83
	P2M	0,29	0,74	0,04	0,86
	P2B	0,29	0,62	-0,44	0,82
	P3A	0,42	0,90	1,63	1,29
	P3M	0,62	0,99	-0,99	1,69
	P3B	0,31	0,99	1,40	0,98
28/07/2010 (41 días después de la regeneración)	MAESTRA	0,27	1,15	3,31	1,20
	P1A	0,26	0,73	0,10	0,66
	P1M	0,19	0,71	0,58	1,45
	P1B	0,17	0,69	-0,09	1,21
	P2A	0,25	0,57	-0,05	0,85
	P2M	0,21	0,66	0,00	1,20
	P2B	0,27	0,65	-0,50	0,86
	P3A	0,32	0,71	1,44	1,06
	P3M	1,00	1,24	-3,55	0,69
	P3B	0,29	0,97	1,05	0,84
MAESTRA PERIODO ESTUDIO		**0,30**	**1,08**	**2,95**	**1,13**

Datos granulométricos de la playa Fontanilla

	ESTACIÓN	TAMAÑO MEDIO - D50 (mm)	SORTING (φ)	SKEWNESS (φ)	KURTOSIS (φ)
01/05/2010 (60 días antes de la regeneración de los perfiles)	Arena préstamo	0,25	0,69	0,63	0,90
	MAESTRA NATIVA	0,21	0,58	0,61	1,07
	P1A	0,26	0,83	1,13	0,92
	P1M*	0,50	1,27	1,81	0,88
	P1B	0,36	1,05	1,32	1,07
29/06/2010 (regeneración de los perfiles)	MAESTRA	0,38	1,19	1,99	1,02
	P1A	0,18	0,31	0,02	0,64
	P1M*	0,20	0,49	0,52	0,86
	P1B	0,26	0,64	0,19	0,93
11/08/2010 (43 días después del vertido de arena)	MAESTRA	0,26	0,82	1,06	0,92
	P1A	0,23	0,71	1,04	0,93
	P1M*	0,32	1,03	1,46	1,01
	P1B	0,23	0,68	0,88	0,90
15/12/2011 (493 días tras el vertido)	MAESTRA	0,22	0,59	0,61	0,92
	P1A	0,19	0,36	0,15	0,47
	P1M*	0,20	0,48	0,18	0,85
	P1B	0,28	0,76	0,42	0,85
MAESTRA PERIODO ESTUDIO		**0,24**	**0,86**	**1,97**	**1,07**

Datos granulométricos de la playa Atunara

	ESTACIÓN	TAMAÑO MEDIO - D50 (mm)	SORTING (φ)	SKEWNESS (φ)	KURTOSIS (φ)
09/02/2011 (57 días antes de la regeneración)	Arena préstamo	0,37	1,26	4,04	1,19
	MAESTRA NATIVA	0,59	1,32	0,75	0,68
	P1A	0,30	1,04	2,33	1,11
	P1M	2,00	0,78	-3,69	0,74
	P1B	0,80	1,15	1,04	0,78
	P2A	0,29	1,08	3,35	1,27
	P2M	0,58	0,55	-0,28	1,21
	P2B	0,91	1,13	-1,35	0,64
07/04/2011 (Regeneración de los perfiles)	MAESTRA	0,42	1,14	1,84	1,10
	P1A	0,31	0,96	1,44	1,23
	P1M	0,74	1,19	-0,21	0,61
	P1B	0,73	0,72	-0,57	1,42
	P2A	0,30	1,09	3,00	1,30
	P2M	0,28	0,79	0,69	1,03
	P2B	0,44	0,71	0,04	1,02
18/05/2011 (41 días después de la regeneración)	MAESTRA	0,48	1,33	2,73	0,53
	P1A	0,31	1,02	2,12	1,32
	P1M	2,00	0,45	-1,79	2,27
	P1B	2,00	0,52	-2,27	1,59
	P2A	0,29	1,11	3,51	1,18
	P2M	0,32	1,04	3,31	1,69
	P2B	0,37	0,57	-0,11	1,06
15/12/2011 (252 días después de la regeneración)	MAESTRA	0,49	1,31	2,58	0,70
	P1A	0,33	1,18	3,16	1,36
	P1M	0,44	1,25	3,99	0,50
	P1B	1,40	0,91	-2,76	0,64
	P2A	0,32	1,13	2,64	1,28
	P2M	0,40	0,75	0,23	1,07
	P2B	0,48	1,19	3,07	0,66
MAESTRA PERIODO ESTUDIO		**0,49**	**1,31**	**2,58**	**0,67**

ANEXO II. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL DENSÍMETRO NUCLEAR Y ENSAYO PROCTOR MODIFICADO.

Playa Victoria

	ESTACIÓN	DENSIDAD (Tn/m3)	HUMEDAD (%)	POROSIDAD (%)	COMPACTACIÓN (%)	PROF. (cm)	PROCTOR MODIFICADO DENSIDAD MÁX. (Tn/m3)	PROCTOR MODIFICADO HUMEDAD ÓPTIMA (%)	PROCTOR MODIFICADO POROSIDAD MÍN. (%)	OBSERVACIONES
19/08/2010 (29 y 35 días antes de la regeneración de los perfiles 1 y 2 respectivamente)	P1 A	1,670	2,8	36,98	97	30	1,730	12,8	34,72	ESTADO PREVIO. Proctor tomado en P1 M. Realizado ensayo de variabilidad espacial de la densidad en <1m. Ver resultados abajo.
	P1Mberm	-	-	-	-	-				
	P1 M*	1,756	17,2	33,74	102	25				
	P1 B	1,759	19,2	33,62	102	30				
	P2 A	1,617	2,0	38,98	93	25	1,730	12,8	34,72	
	P2 Mberm	-	-	-	-	-				
	P2 M	1,730	18,0	34,72	100	25				
	P2 B	1,696	20,0	36,00	98	25				
17/09/2010 (P1 recién regenerado y 6 días antes de la regeneración del P2)	P1 A	1,686	6,1	36,38	99	30	1,710	11,3	35,47	Solo P1 regenerado. Debido a escalón por marea, se toma el P1 Mberm. Estudio efecto lluvia en compactación en P2 (no regenerado)
	P1Mberm*	1,605	4,4	39,43	94	30				
	P1 M	1,652	24,3	37,66	97	30				
	P1 B	1,659	22,5	37,40	97	30				
	P2 A	1,613	6,0	39,13	93	30	1,730	12,8	34,72	
	P2 Mberm	-	-	-	-	-				
	P2 M	1,703	20,6	35,74	98	25				
	P2 B	1,695	21,2	36,04	98	25				
18/09/2010 (1 día después de la regeneración del P1 y 5 días antes del vertido en el P2)	P1 A	1,613	4,6	39,13	94	30	1,710	11,3	35,47	Estudio del paso de una marea en P1 (12 horas después de su regeneración). P2 aún no regenerado. Uso de los Proctor anteriores para cada perfil.
	P1Mberm	1,539	4,2	41,92	90	30				
	P1 M	1,665	22,4	37,17	97	30				
	P1 B	1,660	22,8	37,36	97	30				
	P2 A	1,658	4,4	37,43	96	30	1,730	12,8	34,72	
	P2 Mberm	-	-	-	-	30				
	P2 M	1,697	21,5	35,96	98	30				
	P2 B	1,673	24,1	36,87	97	30				
23/09/2010 (6 días después en P1 y P2 recién regenerado)	P1 A	1,541	4,7	41,85	90	30	1,710	11,3	35,47	Estudio del paso de una marea en P2, (12 horas después de su regeneración). Debido a escorrentía por marea, se toma el P2 Mberm, por encima de escalón (no llega la marea).
	P1Mberm	1,589	3,1	40,04	93	30				
	P1 M	1,705	21,5	35,66	100	30				
	P1 B	1,660	24,5	37,36	97	30				
	P2 A	1,705	4,4	35,66	103	30	1,660	16,5	37,36	

	P2 Mberm*	1,593	7,5	39,89	96	30				Proctor Mod. En P2 Mberm.
	P2 M	1,601	25,3	39,58	96	30				
	P2 B	1,680	21,9	36,60	101	30				
24/09/2010 (7 y 1 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,534	3,4	42,11	92	30	1,710	11,3	35,47	Estudio del primer ciclo de marea en P2 bruscamente extendido. Estudio de 20 pleamares por el P1 y raseado por varias traillas. Marea no llega al P2 Mberm. Mismos valores de Proctor Modificado.
	P1Mberm	1,532	4,0	42,19	92	30				
	P1 M	1,697	22,8	35,96	102	30				
	P1 B	1,665	22,9	37,17	100	30				
	P2 A	1,649	3,9	37,77	99	30	1,660	16,5	37,36	
	P2 Mberm	1,494	6,8	43,62	90	30				
	P2 M	1,661	22,1	37,32	100	30				
	P2 B	1,643	23,7	38,00	99	30				
08/10/2010 (21 y 15 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,602	3,0	39,55	94	30	1,710	11,3	35,47	Estudio de la porosidad 2 semanas tras la finalización de las obras. Estudio del paso de varias mareas vivas equinocciales (Coef.marea=1,12)
	P1Mberm	1,672	4,5	36,91	98	30				
	P1 M	1,656	21,6	37,51	97	30				
	P1 B	1,694	22,5	36,08	99	30				
	P2 A	1,670	2,7	36,98	101	30	1,660	16,5	37,36	
	P2 Mberm	1,536	2,9	42,04	93	30				
	P2 M	1,678	20,5	36,68	102	25				
	P2 B	1,653	22,5	37,62	99	25				
08/11/2010 (52 y 46 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,591	2,8	39,96	93	30	1,710	11,3	35,47	1 mes tras las últimas mareas equinocciales y 41 días tras el perfilado de la playa. Se utilizan los mismos valores de Proctor Modificado.
	P1Mberm	1,576	5,4	40,53	92	30				
	P1 M	1,663	23,1	37,25	97	30				
	P1 B	1,722	14,9	35,02	101	30				
	P2 A	1,656	2,8	37,51	100	30	1,660	16,5	37,36	
	P2 Mberm	1,586	2,8	40,15	95	30				
	P2 M	1,652	21,8	37,66	100	30				
	P2 B	1,625	21,1	38,68	98	30				
16/05/2011 (241 y 235 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,622	2,8	38,79	95	20	1,710	11,3	35,47	8 meses tras el vertido. P2M y P2B están desplazados 50m hacia el norte. Temporal deHs=5m en dic'10 y Hs=3,5m en feb'11.
	P1Mberm	-	-	-	-	-				
	P1 M	1,657	22,5	37,47	97	30				
	P1 B	1,742	17,3	34,26	102	30				
	P2 A	1,632	3,3	38,42	98	15	1,660	16,5	37,36	
	P2 Mberm	1,609	5,5	39,28	97	30				

	P2 M	1,644	20,7	37,96	99	30				
	P2 B	1,681	18,5	36,57	101	30				
13/12/2011 (452 y 446 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,640	1,9	38,11	95	30	1,720	20,4	35,09	15 meses tras el vertido. Paso de la época estival y un temporal de Hs=4m entre octubre y noviembre.
	P1Mberm*	1,549	2,3	41,55	90	30				
	P1 M	1,685	20,7	36,42	98	30				
	P1 B	1,693	20,0	36,11	98	30				
	P2 A	1,668	2,1	37,06	94	30	1,770	18,1	33,21	
	P2 Mberm*	1,650	2,2	37,74	93	30				
	P2 M	1,632	22,4	38,42	92	25				
	P2 B	1,619	23,2	38,91	91	30				
12/04/2013 (937 y 931 días después de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,636	3,1	38,26	100	30	1,630	15,0	38,49	30 meses tras el vertido. Estudio de la evolución a muy largo plazo. El P1M y P2M están encharcados, con más agua que P1B y P2B, respect.
	P1Mberm	1,643	20,0	38,00	101	30	1,630	15,0	38,49	
	P1 M	1,647	22,2	37,85	100	30	1,640	16,2	38,11	
	P1 B	1,696	20,4	36,00	100	30	1,690	19,4	36,23	
	P2 A*	1,728	3,4	34,79	106	30	1,630	15,0	38,49	
	P2 Mberm	1,696	19,9	36,00	104	30	1,630	15,0	38,49	
	P2 M*	1,670	20,7	36,98	102	30	1,640	16,2	38,11	
	P2 B*	1,663	20,6	37,25	98	30	1,690	19,4	36,23	

* Zona de cata para ensayo Proctor Modificado

Playa de Camposoto

							PROCTOR MODIFICADO			
	ESTACIÓN	DENSIDAD (Tn/m3)	HUMEDAD (%)	POROSIDAD (%)	COMPACTACIÓN (%)	PROF. (cm)	DENSIDAD MÁX. (Tn/m3)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	POROSIDAD MÍN. (%)	OBSERVACIONES
25/08/2010 (37 y 5 días antes de la regeneración del P1 y P2 respectivamente)	P1 A	1,738	2,9	34,42	95	25	1,83	13,9	30,94	Los perfiles tomados inicialmente no van a ser regenerados, por lo que el día 25 se toman los datos de densidad en los nuevos Perfiles P1 y P2. Ensayo Proctor Modificado realizado sobre la arena tomada en el Punto P1 M.
	P1 M*	1,809	16,0	31,74	99	25	1,83	13,9	30,94	
	P1 B	1,714	20,8	35,32	94	30	1,83	13,9	30,94	
	P2 A	1,846	2,9	30,34	101	30	1,83	13,9	30,94	
	P2 M	1,757	18,2	33,70	96	30	1,83	13,9	30,94	
	P2 B	1,695	20,2	36,04	93	30	1,83	13,9	30,94	
30/08/2010 (32 días antes del vertido en el P1 y P2 recién regenerado)	P1 A	1,800	1,1	32,08	102	20	1,77	14,4	33,21	Ensayo Proctor Modificado realizado sobre la arena tomada en el Punto P2 M (P2 regenerado). P1 aún no regenerado.
	P1 M	1,868	16,0	29,51	106	25	1,77	14,4	33,21	
	P1 B	1,738	19,6	34,42	98	25	1,77	14,4	33,21	
	P2 A	1,585	3,9	40,19	90	30	1,77	14,4	33,21	
	P2 M*	1,676	18,6	36,75	95	25	1,77	14,4	33,21	
	P2 B	1,601	23,6	39,58	90	25	1,77	14,4	33,21	
31/08/2010 (2 días antes del vertido en P1 y 1 día después del vertido en P2)	P1 A	-	-	-	-	-	1,75	12,7	33,96	Ensayo Proctor Modificado realizado sobre la arena tomada en el Punto P2 M. El P1 no se ha podido tomar al estar siendo regenerado en ese momento.
	P1 M	-	-	-	-	-	1,75	12,7	33,96	
	P1 B	-	-	-	-	-	1,75	12,7	33,96	
	P2 A	1,613	4,3	39,13	92	30	1,75	12,7	33,96	
	P2 M*	1,685	17,2	36,42	96	30	1,75	12,7	33,96	
	P2 B	1,621	22,6	38,83	93	30	1,75	12,7	33,96	
02/09/2010 (P1 recién regenerado y 3 días después en el P2)	P1 A	1,686	5,3	36,38	98	30	1,72	13,2	35,09	Ensayo Proctor Modificado realizado sobre la arena tomada en el Punto P1 M. P1 regenerado. Paso de primeras mareas en P2.
	P1 M*	1,700	19,8	35,85	99	30	1,72	13,2	35,09	
	P1 B	1,702	21,6	35,77	99	30	1,72	13,2	35,09	
	P2 A	1,642	3,8	38,04	95	30	1,72	13,2	35,09	
	P2 M	1,652	12,8	37,66	79	30	1,72	13,2	35,09	
	P2 B	1,676	21,8	36,75	97	30	1,72	13,2	35,09	
03/09/2010 (1 y 4 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	P1 A	1,632	3,3	38,42	95	30	1,71	14,9	35,47	Estudio del paso de 2 pleamares en PO (24 h en lugar de 12 por la luz). Ensayo Proctor Modificado realizado sobre la arena tomada en
	P1 M*	1,673	21,0	36,87	98	30	1,71	14,9	35,47	
	P1 B	1,712	21,0	35,40	100	30	1,71	14,9	35,47	
	P2 A	1,603	4,5	39,51	94	30	1,71	14,9	35,47	
	P2 M	1,588	17,8	40,08	93	30	1,71	14,9	35,47	

	P2 B	1,669	21,5	37,02	98	30	1,71	14,9	35,47	el Punto P1 M.
27/09/2010 (25 y 28 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	P1 A	1,675	2,7	36,79	102	30	1,65	12,3	37,74	**Fin de las obras** de regeneración y perfilado de la playa. Proctor Modificado cogido en el punto P1M. Paso de 3 semanas tras la última medición (**paso de mareas vivas equinocciales**).
	P1 M	1,641	18,3	38,08	99	30	1,65	12,3	37,74	
	P1 B	1,741	19,4	34,30	106	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 A	1,662	3,3	37,28	101	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 M	1,628	15,6	38,57	99	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 B	1,657	20,4	37,47	100	30	1,65	12,3	37,74	
05/11/2010 (64 y 67 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	P1 A	1,747	19,5	34,08	106	30	1,65	12,3	37,74	Medición de la playa 1 mes después de la última medida tras la finalización completa de las obras. Uso del último Proctor Modificado (misma arena).
	P1 M	1,703	22,2	35,74	103	30	1,65	12,3	37,74	
	P1 B	1,672	4,2	36,91	101	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 A	1,615	4,6	39,06	98	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 M	1,677	11,6	36,72	102	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 B	1,659	21,1	37,40	101	30	1,65	12,3	37,74	
23/12/2010 (112 y 115 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	P1 A	1,764	13,0	33,43	107	30	1,65	12,3	37,74	Medición de la playa **tras el paso de varios temporales** de corta duración pero con olas >5 mts y periodo de 10 seg. Uso del último Proctor Modificado (misma arena).
	P1 M	1,688	21,2	36,30	102	30	1,65	12,3	37,74	
	P1 B	-	-	-	-	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 A	1,712	14,9	35,40	104	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 M	1,708	19,4	35,55	104	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 B	-	-	-	-	30	1,65	12,3	37,74	
17/05/2011 (257 y 260 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	P1 A	1,747	2,0	34,08	106	20	1,65	12,3	37,74	Datos tomados **9 meses después del vertido**. Uso del último Proctor Modificado (misma arena).
	P1 M	1,689	19,3	36,26	102	30	1,65	12,3	37,74	
	P1 B	1,777	14,6	32,94	108	30	1,65	12,3	37,74	
	P2 A	1,697	3,0	35,96	103	20	1,65	12,3	37,74	
	P2 M	1,767	16,7	33,32	107	25	1,65	12,3	37,74	
	P2 B	1,689	16,1	36,26	102	25	1,65	12,3	37,74	
13/12/2011 (467 y 470 días después del vertido en el P1 y P2, respectivamente)	P1 A	1,742	3,5	34,26	101	30	1,73	13,5	34,72	Un año después de los últimos temporales. Proctor Modificado tomado en el P1 M. En los puntos P1 B, P2 M y P2 B, cuesta poco meter el densímetro en la arena.
	P1 M	1,643	21,0	38,00	95	30	1,73	13,5	34,72	
	P1 B	1,727	20,5	34,83	100	30	1,73	13,5	34,72	
	P2 A	1,717	3,5	35,21	99	30	1,73	13,5	34,72	
	P2 M	1,789	12,5	32,49	103	30	1,73	13,5	34,72	
	P2 B	1,689	21,0	36,26	98	30	1,73	13,5	34,72	

* Zona de cata de arena para Proctor Modificado

Playa de La Ballena

	PUNTO	DENSIDAD (Tn/m3)	HUMEDAD (%)	POROSIDAD (%)	COMPACTACIÓN (%)	PROF. (cm)	PROCTOR MODIFICADO: DENSIDAD MÁX. (Tn/m3)	PROCTOR MODIFICADO: HUMEDAD ÓPTIMA (%)	PROCTOR MODIFICADO: POROSIDAD MÍN. (%)	OBSERVACIONES
16/04/2010	Frente pared	1678	4,4	36,68	103	15	1630	10,3	38,49	Densidad tomada en cantera: frente pared y arena suelta
	Frente suelto	1343	4,8	49,32	82	30	1630	10,3	38,49	
16/04/2010 (60 días antes de la regeneración de los perfiles)	P1A	1742	12,5	34,26	102	30	1710	9,4	35,47	Estado natural de la paya, anterior a las obras de realimentación y densidad en la zona de acopio recién vertido
	P1M	1741	20,4	34,30	102	30	1710	9,4	35,47	
	P1B	1746	18,8	34,11	102	30	1710	9,4	35,47	
	P2A	1655	6,7	37,55	97	30	1710	9,4	35,47	
	P2M*	1675	16,9	36,79	98	30	1710	9,4	35,47	
	P2B	1723	18,8	34,98	101	30	1710	9,4	35,47	
	P3A	1545	5,2	41,70	90	30	1710	9,4	35,47	
	P3M	1622	18,8	38,79	95	30	1710	9,4	35,47	
	P3B	1714	20,5	35,32	100	30	1710	9,4	35,47	
17/06/2010 (regeneración de los perfiles)	P1A	1458	1,5	44,98	89	30	1630	10,1	38,49	Densidad tomada justo tras la regeneración de la playa
	P1M	1636	22,4	38,26	100	30	1630	10,1	38,49	
	P1B	1693	26,0	36,11	104	30	1630	10,1	38,49	
	P2A	1583	2,4	40,26	97	30	1630	10,1	38,49	
	P2M*	1719	18,4	35,13	105	30	1630	10,1	38,49	
	P2B	1684	22,0	36,45	103	30	1630	10,1	38,49	
	P3A	1622	2,9	38,79	100	30	1630	10,1	38,49	
	P3M	1692	5,4	36,15	104	30	1630	10,1	38,49	
	P3B	1721	20,8	35,06	106	30	1630	10,1	38,49	
28/07/2010 (41 días después de la regeneración)	P1A	1625	4,1	38,68	100	30	1630	11,2	38,49	Densidad tomada un mes tras la finalización de las obras
	P1M	1681	22,0	36,57	103	30	1630	11,2	38,49	
	P1B	1718	24,8	35,17	105	30	1630	11,2	38,49	
	P2A	1566	3,0	40,91	96	30	1630	11,2	38,49	
	P2M*	1583	17,6	40,26	97	30	1630	11,2	38,49	
	P2B	1736	20,3	34,49	107	30	1630	11,2	38,49	
	P3A	1574	3,9	40,60	97	30	1630	11,2	38,49	
	P3M	1770	4,5	33,21	109	30	1630	11,2	38,49	
	P3B	1780	19,9	32,83	109	30	1630	11,2	38,49	

* Toma de arena para Proctor Modificado

Playa Fontanilla

	PUNTO	DENSIDAD (Tn/m3)	HUMEDAD (%)	POROSIDAD (%)	COMPACTACIÓN (%)	PROF. (cm)	PROCTOR MODIFICADO			OBSERVACIONES
							DENSIDAD MÁX. (Tn/m3)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	POROSIDAD MÍN. (%)	
29/06/2010	Recinto tuberia	1552	7,9	41,43	98	30	1580	6,4	40,38	Densidades tomadas en recinto
	Recinto escorr.	1497	23,6	43,51	95	30	1580	6,4	40,38	
01/05/2010 (60 días antes de la regeneración de los perfiles)	P1A	1654	2,7	37,58	88	30	1870	6,3	29,43	Estado natural de la arena
	P1M*	1790	18,0	32,45	96	30	1870	6,3	29,43	
	P1B	1660	22,7	37,36	89	30	1870	6,3	29,43	
29/06/2010 (regeneración de los perfiles)	P1A	1641	2,9	38,08	97	30	1690	9,0	36,23	Justo tras la regeneración
	P1M*	1810	14,4	31,70	107	30	1690	9,0	36,23	
	P1B	1708	21,7	35,55	101	30	1690	9,0	36,23	
11/08/2010 (43 días después del vertido de arena)	P1A	1549	3,6	41,55	91	30	1700	13,2	35,85	Un mes tras la regeneración. Paso de varias mareas
	P1M*	1715	17,9	35,28	101	30	1700	13,2	35,85	
	P1B	1644	22,9	37,96	97	30	1700	13,2	35,85	
15/12/2011 (493 días tras el vertido)	P1A	1594	4,4	39,85	96	30	1660	14,4	37,36	Año y medio tras la regeneración. Paso de varios temporales
	P1M*	1651	19,5	37,70	99	30	1660	14,4	37,36	
	P1B	1684	22,4	36,45	101	30	1660	14,4	37,36	

* Toma de arena para Proctor Modificado

Playa de La Atunara

	PUNTO	DENSIDAD (Tn/m3)	HUMEDAD (%)	POROSIDAD (%)	COMPACTACIÓN (%)	PROF. (cm)	PROCTOR MODIFICADO			OBSERVACIONES
							DENSIDAD MÁX. (Tn/m3)	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	POROSIDAD MÍN. (%)	
09/02/2011 (57 días antes de la regeneración)	Acopio playa	1,615	4,2	39,06	80	30	2,02	13,5	23,77	Estado natural de la paya, anterior a las obras de realimentación y densidad en la zona de acopio recién vertido
	P1A	1,770	4,1	33,21	88	30	2,02	13,5	23,77	
	P1M	1,800	2,4	32,08	89	30	2,02	13,5	23,77	
	P1B	1,929	4,8	27,21	96	30	2,02	13,5	23,77	
	P2A	1,703	4,0	35,74	84	30	2,02	13,5	23,77	
	P2M*	1,737	2,6	34,45	86	30	2,02	13,5	23,77	
	P2B	1,971	8,8	25,62	98	30	2,02	13,5	23,77	
07/04/2011 (Regeneración de los perfiles)	P1A	1,623	3,3	38,75	88	30	1,85	12,8	30,19	Medidas realizadas tras la realimentación de los perfiles
	P1M	1,581	13,1	40,34	85	30	1,85	12,8	30,19	
	P1B	1,837	8,9	30,68	99	30	1,85	12,8	30,19	
	P2A*	1,751	3,0	33,92	95	30	1,85	12,8	30,19	
	P2M	1,601	3,3	39,58	87	30	1,85	12,8	30,19	
	P2B	1,725	14,7	34,91	93	30	1,85	12,8	30,19	
18/05/2011 (41 días después de la regeneración)	P1A	1,675	2,6	36,79	91	30	1,85	12,8	30,19	Medidas realizadas tras un mes desde la realimentación de los perfiles. No se ha tomado Proctor (es lamisma arena)
	P1M	1,525	3,9	42,45	82	30	1,85	12,8	30,19	
	P1B	1,553	4,5	41,40	84	30	1,85	12,8	30,19	
	P2A	1,623	3,3	38,75	88	30	1,85	12,8	30,19	
	P2M	1,746	3,6	34,11	94	30	1,85	12,8	30,19	
	P2B	1,825	8,0	31,13	99	20	1,85	12,8	30,19	
15/12/2011 (252 días después de la regeneración)	P1A	1,649	3,5	37,77	100	30	1,65	14,4	37,74	Medidas realizadas tras siete meses desde la última campaña. Ha pasado 1 temporal (nov2011).
	P1M	1,751	3,1	33,92	106	30	1,65	14,4	37,74	
	P1B	1,915	6,1	27,74	124	30	1,65	14,4	37,74	
	P2A*	1,628	3,2	38,57	99	30	1,65	14,4	37,74	
	P2M	1,670	4,6	36,98	101	30	1,65	14,4	37,74	
	P2B	1,859	10,5	29,85	113	30	1,65	14,4	37,74	

* Toma muestra para Proctor Modificado

ANEXO III. DATOS DEL CLIMA MARÍTIMO Y ATMOSFÉRICO

Clima marítimo

Los datos del clima marítimo presentados en esta Tesis han sido recopilados de la Base de Datos de la página web de Puertos del Estado (2013).

Mareas

La carrera de marea en el Golfo de Cádiz presenta una periodicidad semidiurna (Figura A-III.1), con un rango máximo entre mareas vivas y mareas muertas de 3,6 m (Muñoz y Medina, 2000). En la zona mediterránea de la provincia de Cádiz, el rango mareal disminuye hasta un máximo de 1,5 m (Figura A-III.2). La clasificación de ambas zonas sería de mesomareal para la zona atlántica y micromareal para la mediterránea (Davies, 1964). En la Figura A-III.3, se puede consultar la frecuencia de alturas del nivel del mar (referidas al Cero Hidrográfico) de las estaciones de Bonanza (T.M. Sanlúcar de Barrameda) y de la Bahía de Algeciras.

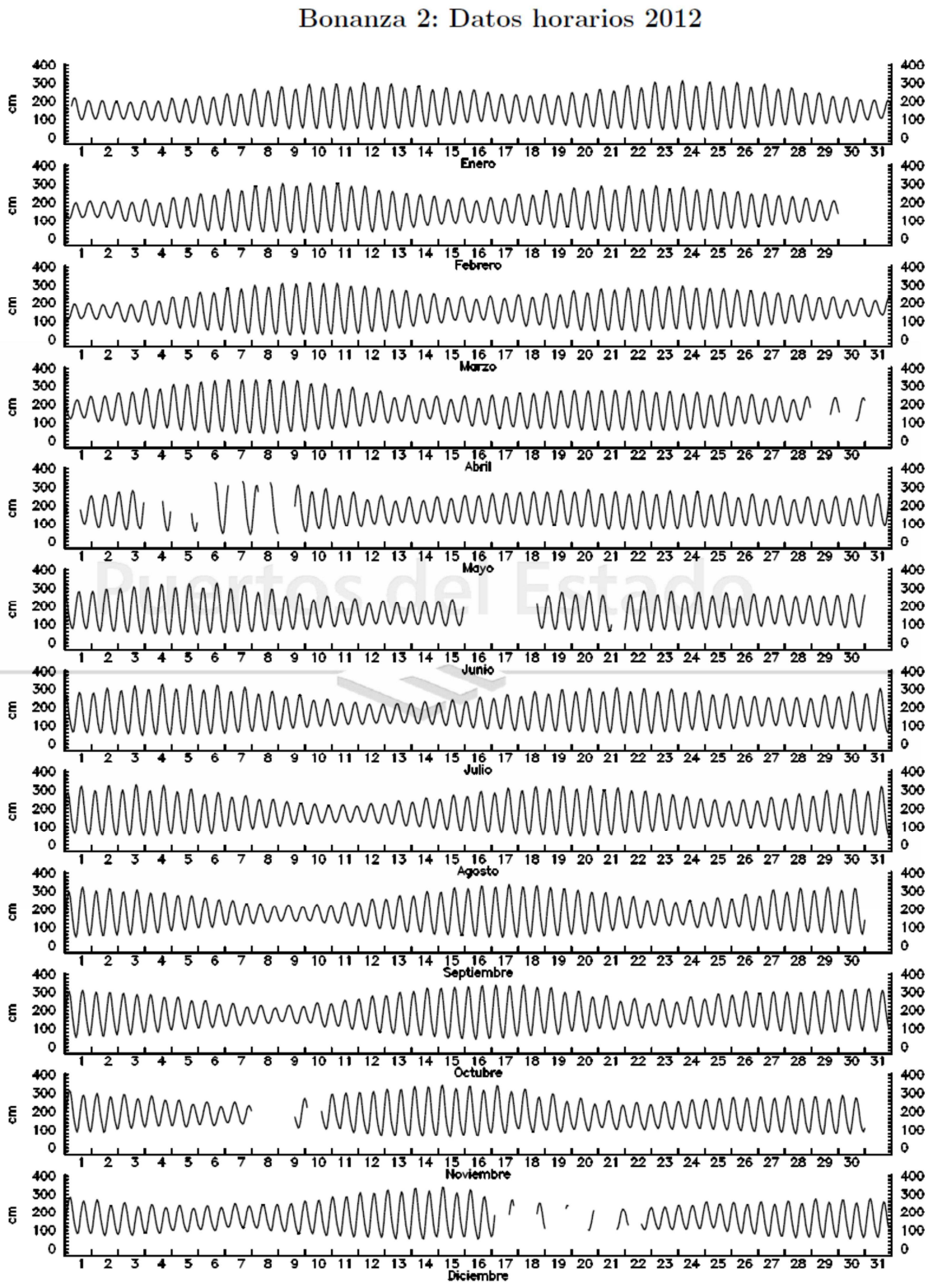


Fig. A-III.1. Datos mareales horarios registrados durante todo el año 2012 en la estación de Bonanza (T.M. Sanlúcar de Barrameda, Cádiz). (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

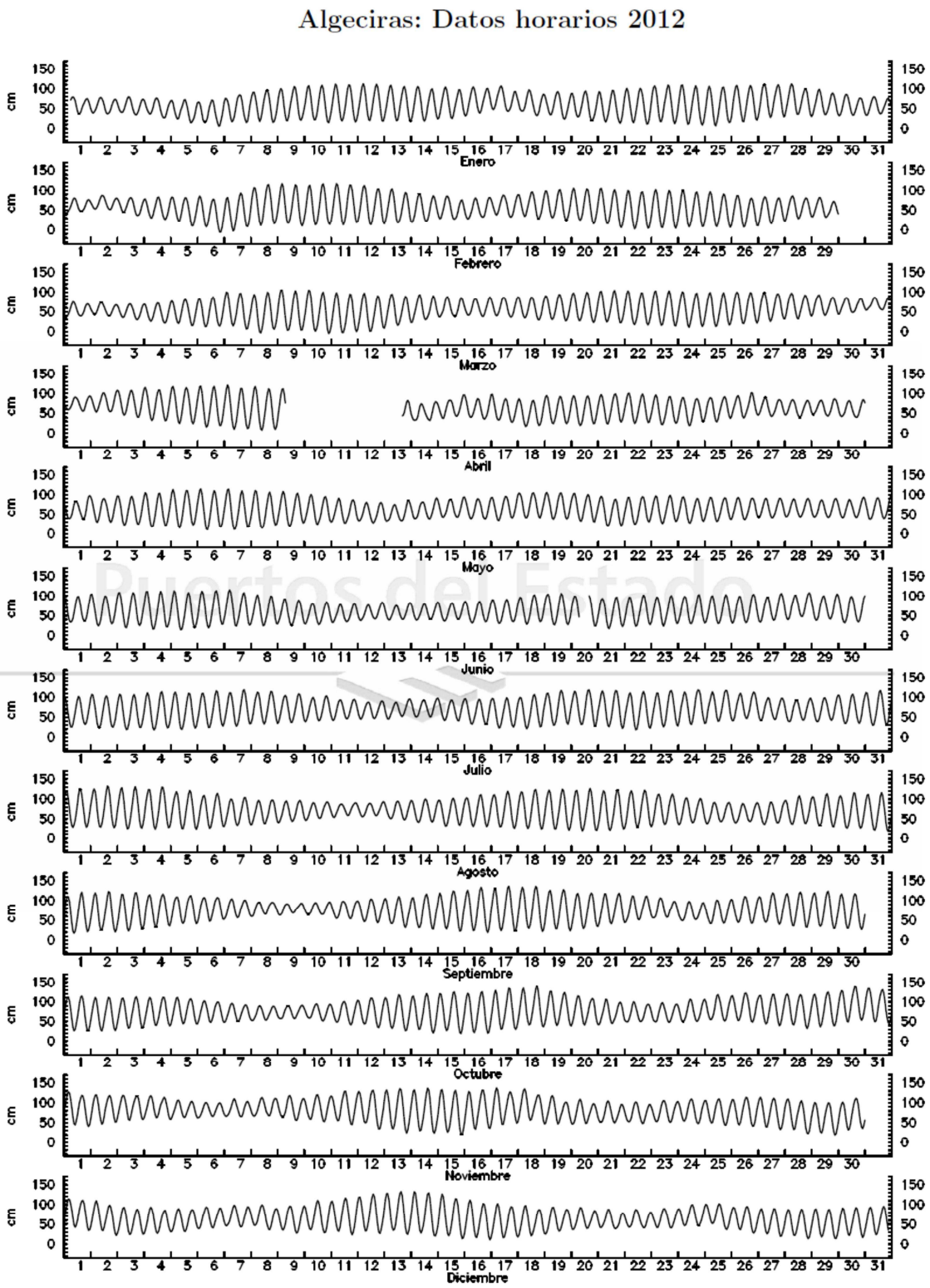


Fig. A-III.2. Datos mareales horarios registrados durante todo el año 2012 en la estación de la Bahía de Algeciras (Cádiz). (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

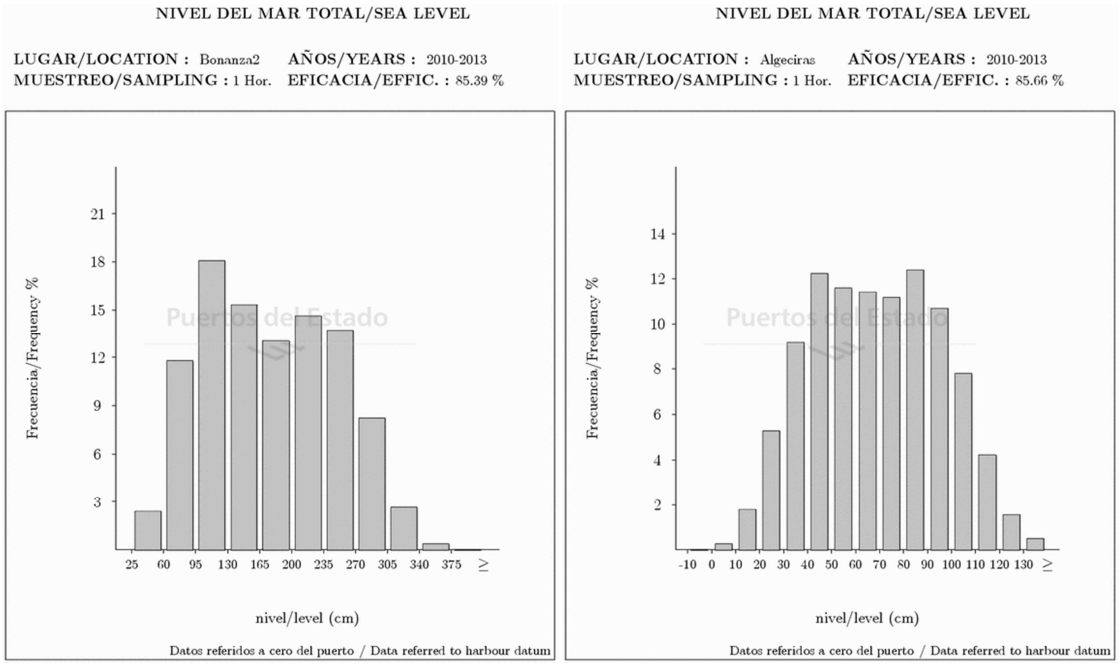


Fig. A-III.3. Histogramas de las frecuencias horarias del nivel medio del mar en la estación atlántica de Bonanza (izd.) y en la estación mediterránea de la Bahía de Algeciras (der.) durante el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

Oleaje

Las olas se aproximan a la costa preferentemente del Oeste (45% de frecuencia anual), con altura media inferior a 1 m y altura de ola significante asociada a temporales de 2 m. En las Figuras A-III.4 y A-III.5, se pueden consultar las rosas de oleaje calculadas a partir de datos registrados en la Boya Costera 1320 de Cádiz y en el punto WANA 2006009 para el intervalo de años 2010-2013 (Puertos del Estado, 2013).

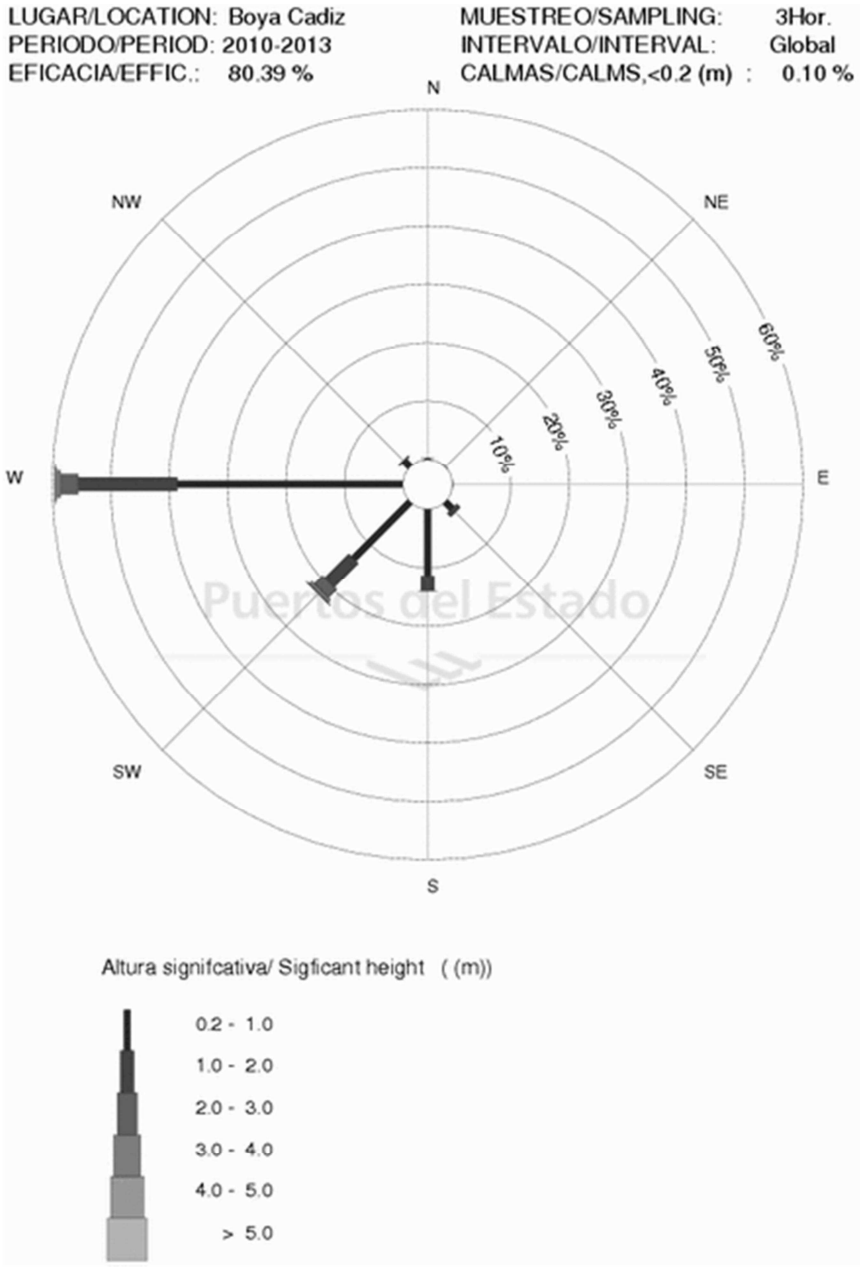


Fig. A-III.4. Rosa de oleaje calculada con datos de la Boya de Cádiz para el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

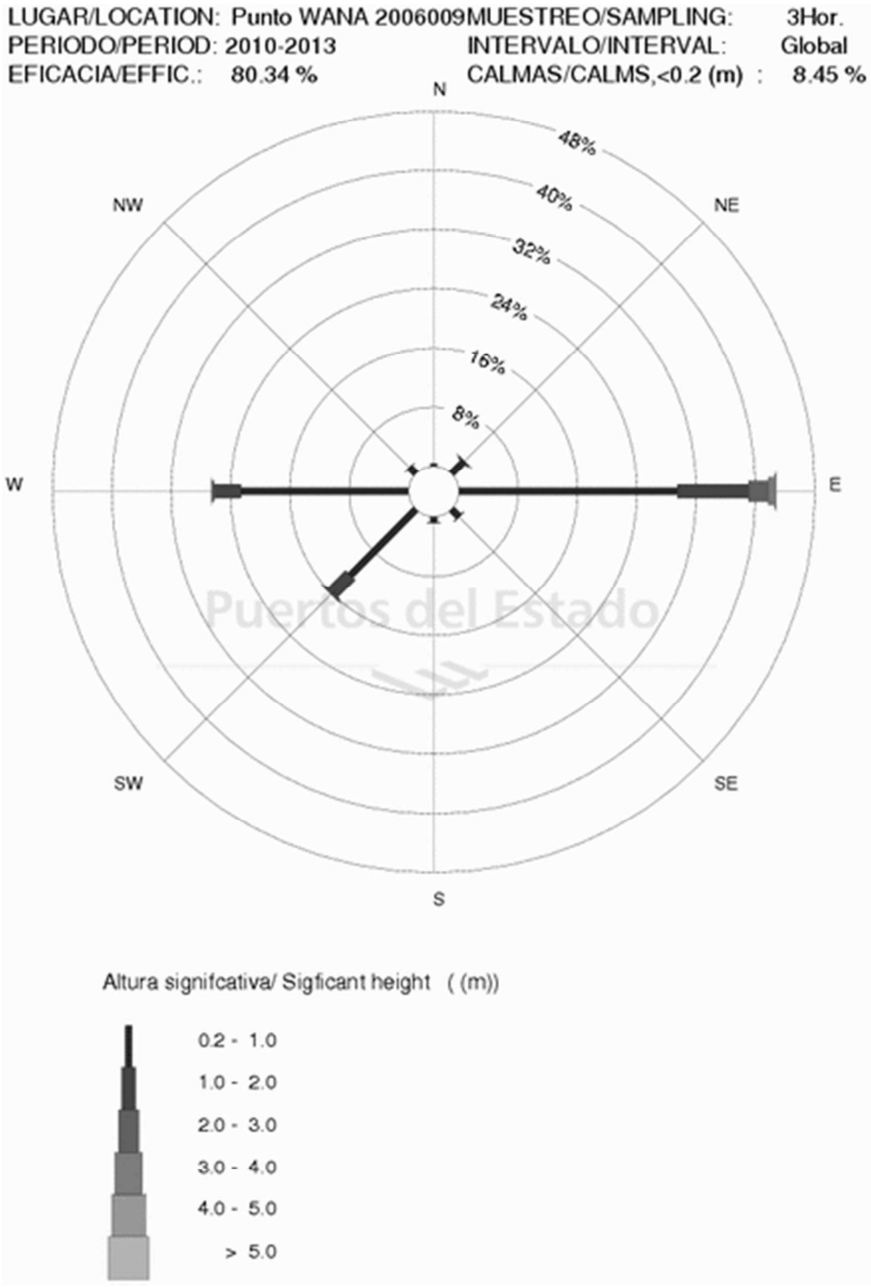


Fig. A-III.5. Rosa de oleaje calculada con datos del punto WANA 2006009 situado junto a Gibraltar para el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

Corrientes

En las Figuras A-III.6 y A-III.7, se representan las rosas de oleaje calculadas a partir de los datos registrados en la boya del Golfo de Cádiz (Atlántico) y en la boya del Mar de Alborán (Mediterráneo).

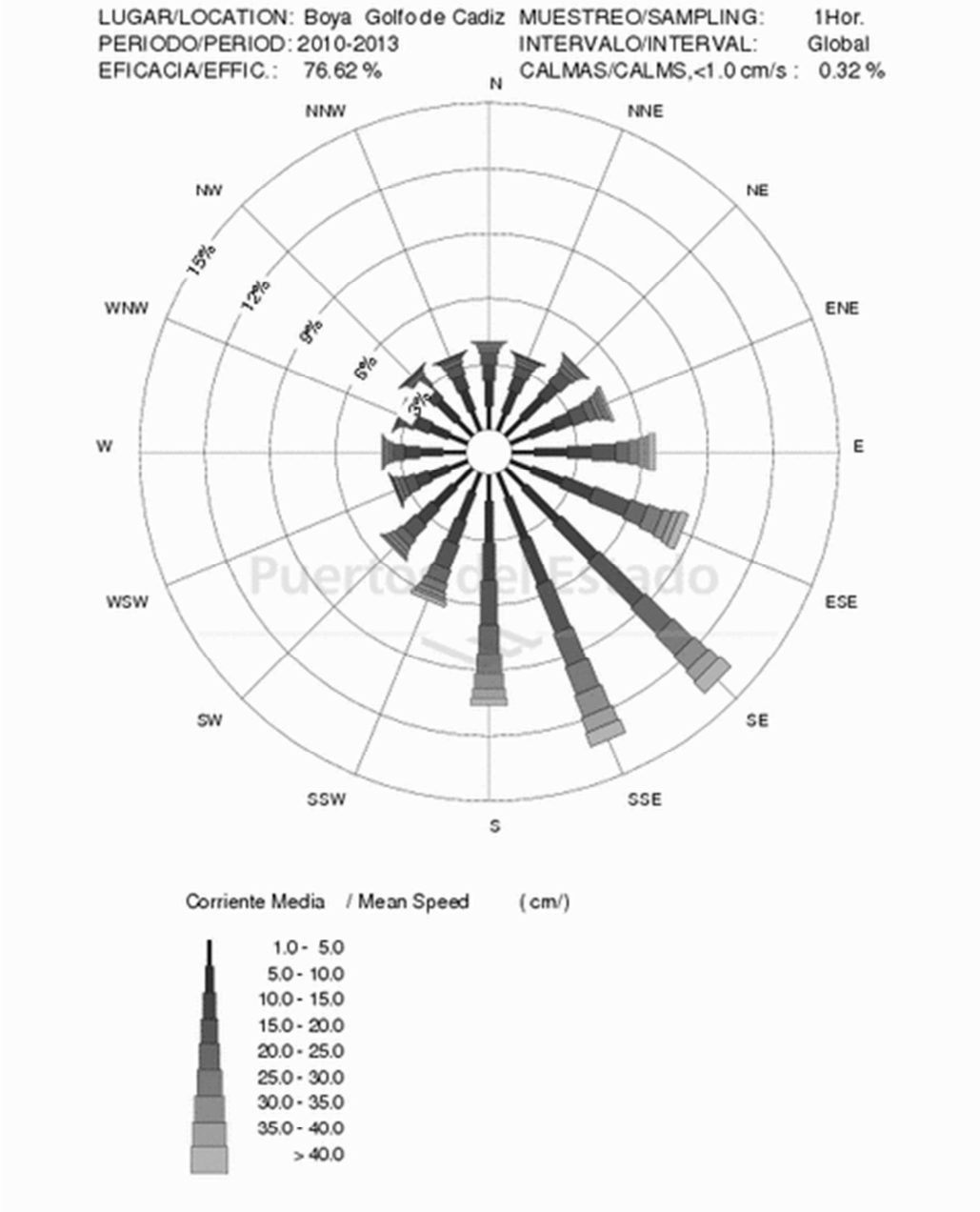


Fig. A-III.6. Rosa de corrientes medias registradas en la Boya del Golfo de Cádiz para el periodo 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

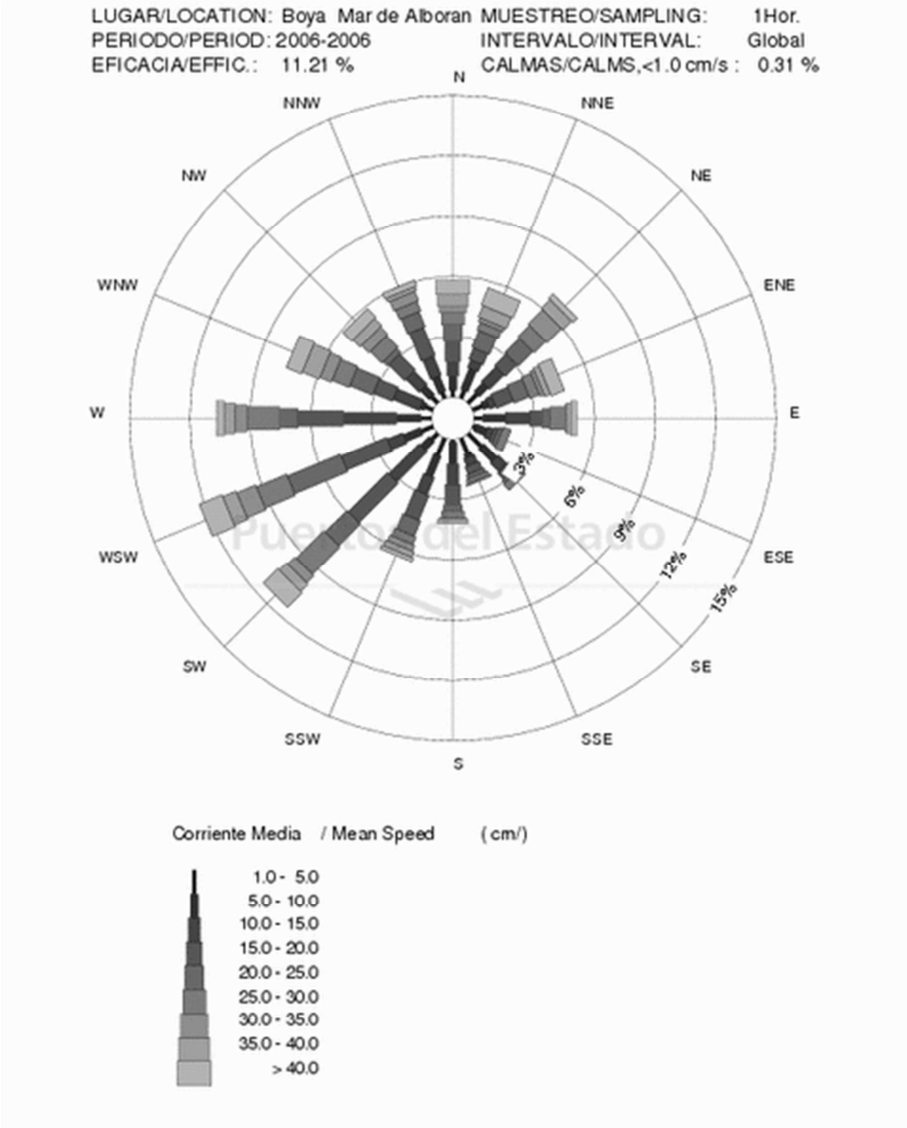


Fig. A-III.7. Rosa de corrientes medias registradas en la Boya del Golfo de Cádiz para el año disponible 2006. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

Clima atmosférico

En el apartado de clima atmosférico, se representan brevemente valores medios de temperatura, viento y precipitación recopilados a través de la base de datos pública de la Agencia Estatal de Meteorología perteneciente al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España (AEMET, 2013) y del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2013), organismo autónomo de carácter administrativo, adscrito al Ministerio de Economía y Competitividad a través de la Secretaría de Estado de Economía y Apoyo a la Empresa.

Temperatura y humedad

En general, el año 2010 tuvo en general carácter cálido, con una temperatura media sobre España de 14,98º Centígrados. El año 2011 fue extremadamente cálido con una temperatura media de 16º C, siendo el año más cálido de la serie histórica (Figura A-III.8). Concretamente en la estación de San Fernando (Cádiz), según la base de datos del INE (2013), la temperatura media a lo largo del periodo de estudio 2010-2011, fue de 19,4º C (Tabla A-III.1), mientras que el año 2012 tuvo un carácter cálido con una temperatura media de 15,3º C (AEMET, 2013). El invierno resultó más frío de lo normal, mientras que en el resto de las estaciones las temperaturas medias superaron los valores normales, con una anomalía cálida especialmente significativa en verano, estación en la que las temperaturas superaron en cerca de 2º C los valores medios normales (AEMET, 2013). En el caso del año 2013, la campaña se realizó en el mes de Abril, mes donde las temperaturas se han situado en conjunto algo por encima de los valores normales, con una temperatura media mensual de 12,9º C (AEMET, 2013). Con respecto a la humedad, la media anual durante los años 2010 y 2011 osciló entre el 70 y el 73% (INE, 2013).

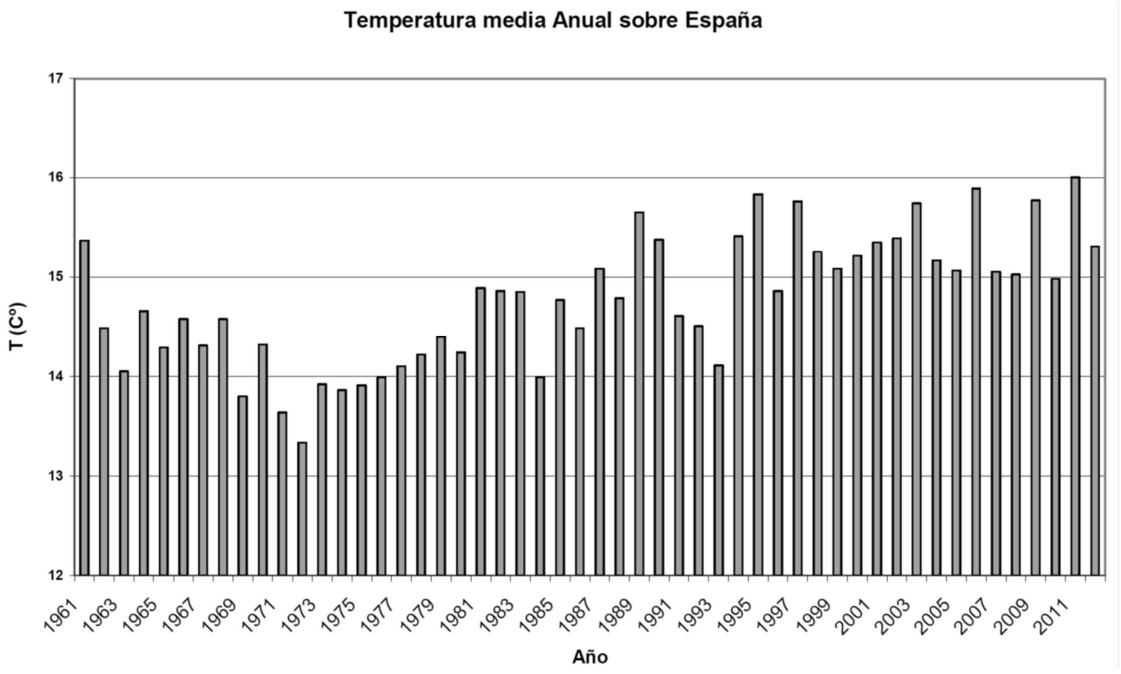


Fig. A-III.8. Serie de temperaturas medias sobre España, periodo 1961-2012 (Fuente: AEMET, 2013).

Tabla A-III.1. Temperaturas medias mensuales registradas en la estación meteorológica de San Fernando, Cádiz. (Fuente: INE, 2013).

Temperaturas medias mensuales - Estación de San Fernando (Cádiz)												
Año	Media	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2010	19,3	13	14,3	15,4	18,5	19,7	21,7	26,4	27,9	24,5	19,3	15,9	14,6
2011	19,5	13,4	13,8	15	18,9	21,8	24,2	24,8	25,3	24,5	22,7	16,4	13,3

Precipitaciones

Con respecto al viento, en general el año 2010 resultó muy húmedo en la mayor parte de España, especialmente en el tercio sur, con un valor medio de 855 mm, excediendo en más de un 30% al valor medio normal (Tabla A-III.2). La mayor parte de esta anomalía positiva de precipitación se acumuló durante los meses invernales (enero, febrero y diciembre), mientras que por el contrario los meses estivales fueron secos, especialmente julio, mes en el que llovió en el conjunto de España el 50% del valor medio normal (AEMET, 2013). En cambio, los años 2011 y 2012 fueron más secos de lo normal en la mayor parte de España. Para ambos años, la precipitación media en España se sitúo respectivamente en torno a un 13% y un 15% por debajo del valor medio normal (AEMET, 2013).

Tabla A-III.2. Precipitaciones total mensuales (mm) registradas en la estación meteorológica de San Fernando, Cádiz. (Fuente: INE, 2013).

Precipitaciones totales mensuales (mm) - Estación de San Fernando (Cádiz)												
Año	Media	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2010	659,8	140	206,6	82,6	33,8	16,2	18,8	0	0,6	27	0	29,8	104,4
2011	443	38,5	63,1	94,5	26,6	15,7	12,9	0	1,2	30,5	54,2	102,2	3,6

Viento en superficie

Por lo que respecta al viento cabe destacar que a lo largo de 2010 la velocidad media del viento fue de 13,8 m/s, siendo muy similar a la media de 2011 (14,1 m/s) y a la de 2012 (13,1 m/s). En cambio, en el primer semestre de 2013, la velocidad media del viento fue de 16,1 m/s, con una velocidad media registrada en el mes de abril (coincidiendo con la última campaña de la playa Victoria) de 13,1 m/s (Tabla A-III.3). Asimismo, en la Figura A-III.9, se puede consultar la velocidad media del viento (m/s) y su frecuencia de ocurrencia durante el periodo de estudio 2010-2013.

Tabla A-III.3. Datos mensuales de la Velocidad media del viento (m/s) registrada en el Punto WANA 1054046 para los años 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

	2010				2011				2012				2013			
Mes	Vm	Dir.	Día	H.	Vm	Dir.	Día	H.	Vm	Dir.	Día	Hora	Vm	Dir.	Día	H.
Ene	14,9	237	5	0	15,9	107	24	0	12,3	7	17	6	20,8	275	19	14
Feb	16,2	149	27	12	14,5	241	16	12	13,2	31	4	9	16,7	273	23	5
Mar	16,1	134	2	12	15,9	119	25	0	14,9	113	23	9	18,5	117	4	8
Abr	14,3	136	15	0	17	112	6	0	14,9	259	14	12	13,1	108	24	1
May	14,3	99	21	6	15,5	118	16	6	14,6	274	20	18	14,3	236	17	13
Jun	13,7	225	9	12	11,8	114	26	6	10,5	346	12	6	13,3	118	25	0
Jul	10,9	114	27	12	9,9	265	3	18	11,6	108	16	21	-	-	-	-
Ago	10,5	116	31	12	-	-	-	-	10,3	271	5	18	-	-	-	-
Sep	9,3	117	13	6	10,9	106	30	21	10,6	153	27	11	-	-	-	-
Oct	14,7	239	31	0	16,5	202	24	6	13,4	198	25	17	-	-	-	-
Nov	13,6	269	9	6	15,6	122	14	0	18,5	120	8	7	-	-	-	-
Dic	16,5	114	10	12	11,7	338	3	0	12,4	218	7	8	-	-	-	-
Media	**13,8**	**162**	**17**	**8**	**14,1**	**168**	**17**	**6**	**13,1**	**175**	**15**	**12**	**16,1**	**188**	**19**	**7**

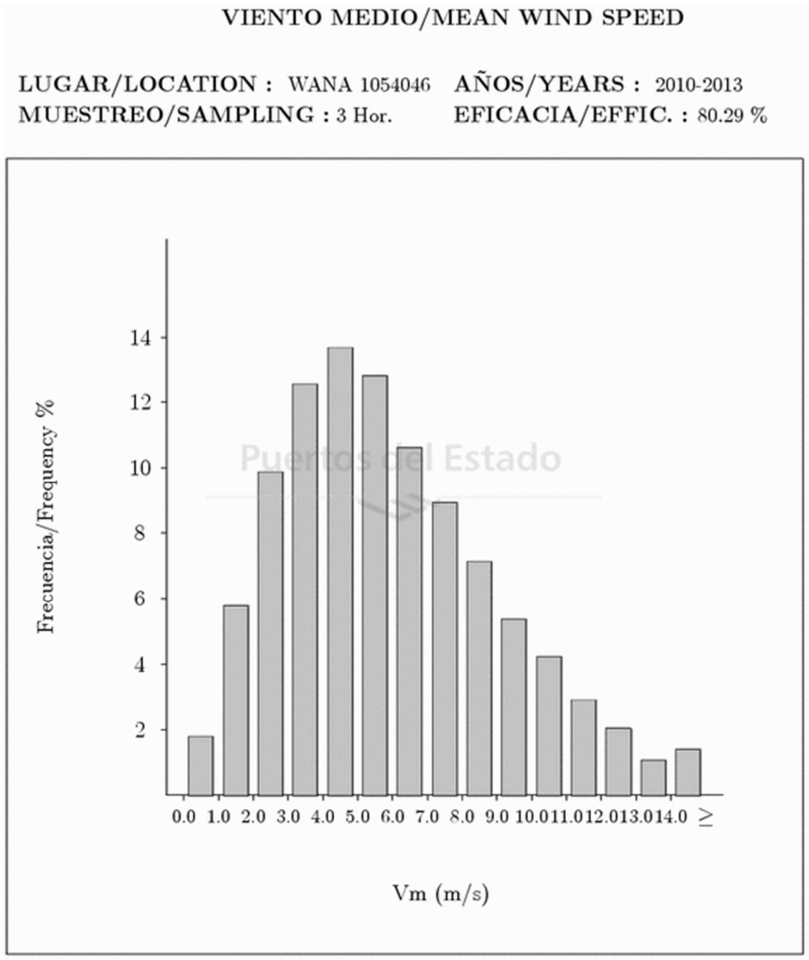


Fig. A-III.9. Velocidad media del viento (m/s) y frecuencia de ocurrencia durante el periodo de estudio 2010-2013. (Fuente: Puertos del Estado, 2013).

ANEXO IV. PUBLICACIONES DERIVADAS

Coastal Engineering 83 (2014) 221–232

Contents lists available at ScienceDirect

Coastal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/coastaleng

Beach nourishment effects on sand porosity variability

J. Román-Sierra *, J.J. Muñoz-Perez, M. Navarro-Pons

Applied Physics Department, Sea Sciences Faculty, University of Cadiz, 11510 Puerto Real, Cadiz, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 7 June 2013
Received in revised form 7 October 2013
Accepted 10 October 2013
Available online 14 November 2013

Keywords:
Porosity
Beach sand
Bulk density
Beach nourishment
Grain size analysis
Beach monitoring

ABSTRACT

A standard assumption in coastal engineering is that the porosity of natural beach sand (non-cohesive) is 40%. However, is this assumption correct for all beach sand? This paper proposes an accurate and simplified method to assess changes in sand porosity after beach nourishment by means of in-situ density surveys through a nuclear densimeter. This novel application has been applied to different beaches in the southwest of Spain according to the tidal range, grain size and beach morphology in several terms. General results show that sand porosities range from 25.6% to 43.4% after beach nourishment works. This research can be considered a support tool in coastal engineering to find shifting sand volumes as a result of sand porosity variability after beach nourishment and later marine influence.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Coastal erosion is a natural phenomenon that is a growing problem. Over the last few decades, there has been a gradual change from hard to soft coastal defence techniques. For example, beach nourishment has become the favoured erosion mitigation strategy in many areas of the world (Dean, 2003; Trembanis and Pilkey, 1999). Furthermore, periodic artificial nourishment is widely regarded as an acceptable method of beach and dune protection and restoration (Hanson et al., 2002). Several studies regarding the management and economic evaluation of beach erosion and nourishment around the world have been presented (Gomez-Pina et al., 2007; Hamm et al., 2002; Hanson et al., 2002; Muñoz-Perez et al., 2001a; Trembanis and Pilkey, 1999).

According to Dean (2003), after beach nourishment activities are performed, sand volumetric evolution, particularly the proportion of sand volume that remains within the region where the sand was placed, is of interest. The interstitial system of sandy beaches is lacunar, and its dimensions are defined by the sand granulometry and grain shape. The system can be described by features such as the pore size, density, porosity, permeability and water content (McLachlan and Turner, 1994). The bulk density is an indicator of soil compaction, which is related to its porosity and permeability. An important consideration in sediment motion (S_l) is the porosity index (η):

$$S_l = I_l/(\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot (1-\eta) \quad (1)$$

where ρ_s and ρ_w are the soil and sea water densities, respectively, g is the acceleration due to gravity, and I_l is the underwater weight of material moved alongshore per second (Kamphuis et al., 1986).

The porosity is a primary determinant of the density and permeability of sediments; therefore, the porosity is a vital input for basin modelling (Chuhan et al., 2002). According to Poizot et al. (2013), the permeability of a sand bed may also be correlated with the sand grains' size (mean, sorting and skewness) and sphericity in addition to the bed porosity.

The porosity of dune and beach sand deposits was studied by Fraser (1935) and Pryor (1973), and the Holocene barrier island sand deposits were studied by Beard and Weyl (1973). Numerous studies of geological and geotechnical engineering applications to measure the maximum and minimum porosities for different grain size distributions and/or sorting coefficients have been conducted (Bloom et al., 2010; Curry et al., 2004; Gaither, 1953; King, 1899). However, none of these authors studied porosity for beach-monitoring purposes. According to the USACE (2002), good porosity data are often not available. The standard assumption in longshore transport computations is that the porosity of natural beds (non-cohesive) is 40% and the grain content is 60% (USACE, 2002), but the values for real sand bands are likely to vary significantly from these values (Galvin, 1979).

According to Dean (2003), after a beach nourishment project, some sand volume is lost because waves cause the sand to spread along the shoreline and move offshore, smoothing the shore profile. The primary purpose of this study is to demonstrate that much of the volume loss after beach nourishment procedure can be due to porosity decrease. Our primary hypothesis is that any type of beach nourishment activity results in a significant increase in sand porosity, largely due to the massive and disorganised dumping of a mixture of sediment and water (in this case 20 and 80%, respectively) on the backshore and

* Corresponding author. Tel.: +34 956016595; fax: +34 956016079.
E-mail addresses: jorge.roman@uca.es (J. Román-Sierra), juanjose.munoz@uca.es (J.J. Muñoz-Perez), marina.navarro@uca.es (M. Navarro-Pons).

0378-3839/$ – see front matter © 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.
http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.009

foreshore by a trailing suction hopper dredge. The porosity subsequently decreases until it reaches its native value because of waves and tides cause spatial re-accommodation of the grains. An accurate and novel application of in-situ measurements of the density (and thus porosity) of beach sand using a high-quality nuclear densimeter gauge is described herein.

2. Study area

The coastline that is studied is located in the southwest of Spain near the Strait of Gibraltar (Fig. 1) and faces the Atlantic Ocean (Victoria and Camposoto beaches) and the Mediterranean Sea (Atunara beach). Both the Victoria and Camposoto beaches, the former located in the city of Cadiz, are dissipative beaches (Muñoz-Pérez and Medina, 2000; Poizot et al., 2013) composed of medium and fine moderately sorted sands. However, whereas Victoria has a seaside promenade, Camposoto is a natural beach with a backshore dune ecosystem. In contrast, Atunara beach, located just north-east of Gibraltar, is reflective (Masselink and Short, 1993), with a promenade and short transverse breakwaters, and is composed of coarse poorly sorted sand. Most beaches on the Gulf of Cadiz are composed of sands that are 90-95% quartz and 5-10% bioclastic material (Muñoz-Perez and Medina, 2010). In the case of the Victoria and Camposoto beaches, borrow sediments have been sourced from the nearby offshore Meca sand bank, a triangular submerged shelf (composed of medium sands) lying at 15 to 20 m depth 5 km west of Cape Trafalgar (36°12′ N; 6°05′ W) (Román-Sierra et al., 2011). In the case of Atunara beach, the borrow sediments were dredged from an adjacent fishing port. According to the scheme devised by Davies (1964), the study region can be classified as meso- (Atlantic beaches) and microtidal (Mediterranean beaches), with maximum ranges of 3.80 - 0.20 m and 1.50 – 0.00 m at spring and neap tides, respectively, exhibiting a semidiurnal periodicity.

3. Materials and methodology

Monitoring the behaviour of several beaches through topographic levelling enables comparison with previous studies and prediction of future sand requirements to optimise environmental and economic impacts (Muñoz-Perez et al., 2001a). According to the USACE (2002), it is essential to evaluate the behaviour of the grains and void index at different sand beaches, especially before and after beach nourishment. An accurate sand volume can thus be useful for beach nourishment projects. Moreover, knowledge of the sand's density, sand's porosity, sand's grain size, wave height and topography is crucial for achieving these objectives because the wave and tidal climate can change the sorting, grain size and porosity within a sediment bed (Kakinoki et al., 2011).

Other authors have developed different methodologies for determining sand density and porosity. Pryor (1973) used volumetric methods, whereas Lundegard (1992) quantitatively estimated the amount of porosity loss through compaction and cementation. Atkins and McBride (1992), Curry et al. (2004) and Dickinson and Ward (1994) point-counted the upper surface of thin sections of epoxy- or superglue-impregnated samples in reflected light. Among the various methods that have been applied by different researchers (Beard and Weyl, 1973; Roberts et al., 1998), it is worth mentioning the use of diver cores with in-situ conductivity probes and X-ray computed tomography (CT) scanning techniques (Bloom et al., 2010; Briggs et al., 2010). However, Dickinson and Ward (1994) have noted the difficulty of obtaining in-situ sand samples in which porosities can be measured without disturbing the loosely packed grains. In contrast with other techniques, sediment disturbance does not occur during in-situ nuclear densimeter measurements. This technique is also much less laborious, very accurate and non-destructive (Roberts et al., 1998). These properties are very important because grain crushing can result in tighter grain packing and a reduction of the primary porosity (Chuhan et al., 2002), thereby yielding an incorrect measurement.

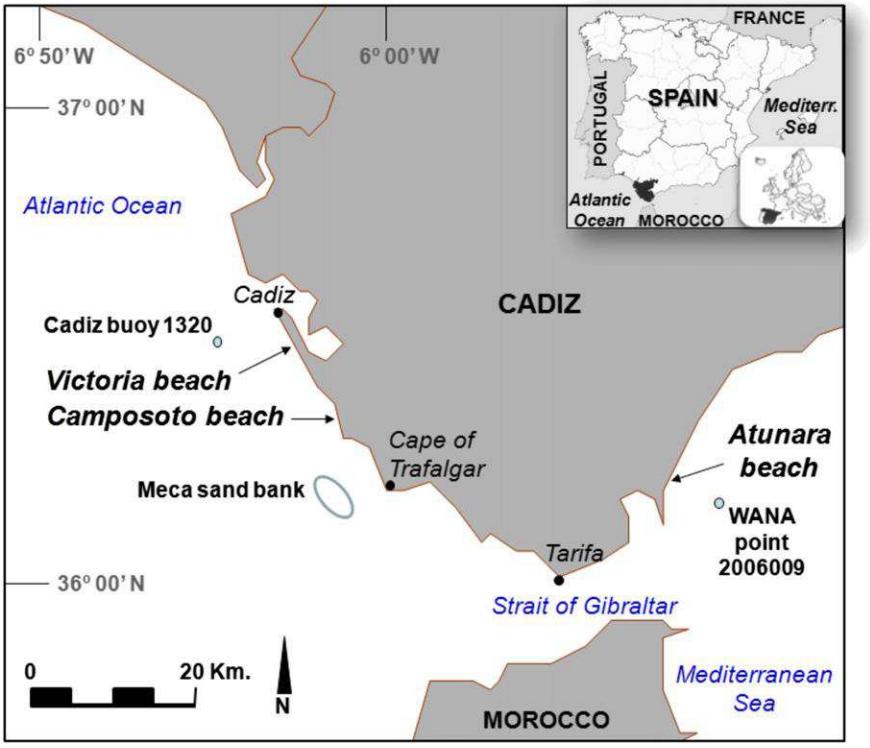


Fig. 1. Locations of the three studied beaches (Victoria, Camposoto and Atunara) and the Meca sand bank (the source of borrow sand for the first two beaches) in southwest Spain.

3.1. Method for measuring the in-situ density and water content

The method used in this work was designed to determine the in-situ bulk density and water content of the beach sand layer to a depth of 0.3 m using a nuclear densimeter gauge (Fig. 2A). According to McLachlan and Turner (1994), the most important processes that occur in this sand layer are water filtration and input of seawater by tides, wave run-up and subtidal wave pumping. In the southwest of Spain, this depth is sufficient for registering changes in the disturbance depth due to tides and waves. Anfuso (2005) established that the values of the disturbance depth are less than 0.22 m, and according to Muñoz-Perez and Medina (2000), the maximum difference of the levelling due to the fortnightly tidal cycle at Victoria Beach was not significantly greater. A methodology to determine the sediment mixing depth for steep and gentle foreshores can be found in Ferreira et al. (2000).

The nuclear densimeter method has been previously used to measure bulk densities of sediments in a laboratory (Roberts et al., 1998), but this method has not been used in beaches. Nuclear density gauges are normally used for quality control and acceptance testing of compacted soil and soil-aggregate mixtures used in civil construction (of roads and earth dams, for example), for which high precision is required. The non-destructive nature of nuclear density gauges enables repetitive measurements at a single test location and the possibility of a statistical analysis of the results.

According to the norm ASTM (2010), a 60-second time interval is used for the counting period. The source extends through the base of the gauge into a predrilled hole and is positioned at a desired depth up to 0.3 m (12 in.). The detector remains on the surface. The machine determines the density of the material using the attenuation of gamma-ray radiation by counting the number of photons emitted by a radioactive source (caesium-137) and reading them using detector tubes in the gauge base (Fig. 2B). The water mass per unit volume is determined by the thermalisation or slowing of fast neutrons by hydrogen.

To study the density after maximum sediment compaction (within an optimum humidity) for native beach sand and borrowed marine sand, two samples from each beach (collected before and after sand dumping) were taken to the laboratory to undergo the modified Proctor geotechnical compacting test (ASTM, 2012). This test provided the basis for determining the maximum compaction and optimal water content of each sand sample. Using this test, it is possible to determine whether different sands exhibit similar compression behaviour given the same incident energy.

3.2. Technique for measuring porosity

Porosity is the volume of the pore space within the unit volume of the sediment bed, whereas the grain content is the sediment fraction of the volume. According to the USACE (2002), porosity can be defined as the ratio of the pore space, or voids, to the entire volume. Density is the mass per unit volume of a material, which is measured in kilograms per cubic meter (kg/m^3) in SI units.

Thus, the porosity of a beach sand sample can be easily calculated from the measured bulk density. For a three-component system that consists of sand grains, sea water and atmospheric air, the bulk density (ρ_b) is given by:

$$\rho_b = (\rho_s \cdot \alpha) + (\rho_w \cdot \beta) + (\rho_a \cdot \gamma) \quad (2)$$

where ρ_s is the most representative grain density (2,650 kg/m^3), α is the grain concentration (which is the value to be obtained), ρ_w is the sea water density (1,025 kg/m^3), β is the water content, ρ_a is the air density, and γ is the proportion of air in the bulk.

However, compared with the sediment and sea-water densities, the air density ρ_a can be considered negligible. Consequently, the third component is approximately zero. Therefore, the grain content can be expressed as follows:

$$\alpha = [\rho_b - (\rho_w \cdot \beta)]/\rho_s \quad (3)$$

Using (3), the sediment porosity can be calculated once the dry bulk density (kg/m^3) in-situ registered value is measured. The total volume

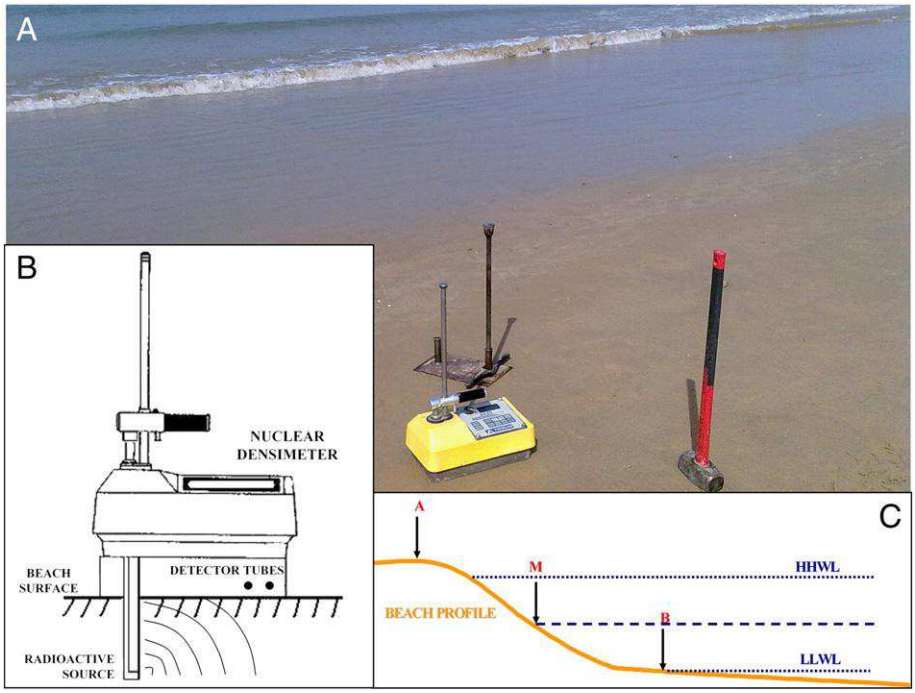


Fig. 2. A) Nuclear density gauge operated on the beach; B) nuclear densimeter sketch; C) beach profile scheme: A (above the highest high-water level), M (intertidal site at mean water level) and B (close to the lowest low-water level).

Table 1
Maximum density related to optimal humidity after a modified Proctor compacting test for native beach sand (i.e. before nourishment) and borrow sand dredged from the seabed (after sand dumping).

	Native beach sand		Borrowed marine sand		Relative differences	
	Density (kg/m3)	Humidity (%)	Density (kg/m3)	Humidity (%)	Density (%)	Humidity (%)
Victoria	1730	12.8	1710	11.3	1.2	11.7
Camposoto	1830	13.9	1770	14.4	3.3	3.5
Atunara	2020	13.5	1850	12.8	8.4	5.2

Table 2
Computational precision results based on beach sand heterogeneity established for a 1 m^2 area at site P2M.

	Density (kg/m^3)	Porosity (%)
Left top corner	1644	38.0
Right top corner	1650	37.7
Left down corner	1646	37.9
Right down corner	1640	38.1
Center	1656	37.5
Mean	**1647**	**37.8**
Std. Dev.	**6.1**	**0.2**
Max. Abs. Error	**16**	**0.6**
Max. Rel. Error (%)	**0.9**	**1.6**

is defined as the sum of the porosity (η) and the grain content (α). Therefore, we can write:

$$\eta = 1 - \alpha \tag{4}$$

Using (3) and (4), we can calculate the proportion of grains in sediment and the porosity. The absolute porosity variability and its relative differences are evaluated in combination with grain size analyses and wave data.

3.3. Field surveys

The methodology presented above was applied to three beaches in the southwest of Spain with different characteristics regarding the grain size, tide, wave energy and beach morphology. At Victoria, Camposoto and Atunara beaches, two transversal profiles (P1 and P2) were established along the nourished coastline. To study the entire cross-shore profile, the following three sampling sites were settled (Fig. 2c): dry beach at the supratidal zone (A), the intertidal zone (M), and the low-tide zone (B). Because the nuclear densimeter does not function under seawater, the sites in B were taken near the low tidal level. Furthermore, at Victoria beach, an extra point (Mberm), which was located between points A and M, was used because of the formation of a large berm after sand dumping. Because of the low tidal range at Atunara beach, the tidal effects on the porosity variability were not considered.

Complete monitoring of the density, humidity and topographic levellings was performed at all three beaches over the short, medium and long term (days, weeks and months, respectively). The goal of the monitoring was to study the effect of different phenomena on the internal beach sand porosity. Furthermore, the absolute porosity variability and relative differences (with "+" and "-" symbols for increasing and decreasing porosity, respectively) were calculated for all three beaches.

Sand sampling, analysis of the grain size and collection of master samples were performed according to the recommendations proposed by Medina et al. (1994), Román-Sierra et al. (2013) and USACE (2002). Samples were dry sieved for 10 min in a Ro-Tap sieve shaker machine operated at 2.6 rpm and 300 taps/min. The individual sieve

Table 3
Analytical precision based on the reproducibility of several analyses of samples obtained at the same point at sites P2A and P2M.

	P2A		P2M	
	Density (kg/m^3)	Porosity (%)	Density (kg/m^3)	Porosity (%)
Analysis I	1708	35.5	1653	37.6
Analysis II	1706	35.6	1665	37.2
Analysis III	1720	35.1	1647	37.8
Analysis IV	1728	34.8	1643	38.0
Analysis V	1715	35.3	1650	37.7
Mean	**1715**	**35.3**	**1652**	**37.7**
Std. Dev.	**8.9**	**0.3**	**8.3**	**0.3**
Max. Abs. Error	**22**	**0.8**	**22**	**0.8**
Max. Rel. Error (%)	**1.2**	**2.1**	**1.3**	**2.2**

Table 4
Historical sand porosity data from published sources. Adapted from Curry et al. (2004) and updated.

		Sand porosities (%)		
Authors	Year	Packed	Natural	Loose
King	1899	32	36.8	40
Ellis and Lee	1919	-	40 - 46.5	-
Meinzer	1923	-	48	-
Terzaghi	1925	39	-	49
Trask	1931	-	-	45.5 - 47.4
Graton and Fraser	1935	26	35 - 40	47.6
Fraser	1935	-	41.6 - 44.2	-
Tickell and Hiat	1938	37.6 - 39.4	-	-
Kolbuszewski	1948	31.6	-	49.7
Gaither	1953	36 - 37.7	-	-
Hamilton and Menard	1956	-	38.3 - 47.7	-
Ludwick	1956	-	-	39.9 - 47.9
Breslau	1967	-	39.1 - 48.2	-
Erchul and Nacci	1972	35.8	-	42.3
Pryor	1972	-	45.0 - 50.8	-
Beard and Weyl	1973	23.4 - 43.5	40.8 - 44	-
Erchul	1974	26 - 32	39.5 - 41.0	40 - 47
Jackson	1975	37.9 - 38.5	39	46.5 - 48.0
Jackson et al.	1978	33 -60	-	42 - 66
Hamilton and Bachman	1982	35	38.6 - 48.5	-
Packwood	1983	-	30	-
Arulanandan	1991	32	-	44
Briggs	1994	-	36.5 - 44.0	-
Dickinson and Ward	1994	-	19.6 - 45.6	-
Bennett	1999	39 - 40	-	42 - 43
Bennett et al.	1999	37.5	41.6 - 44.5	42
Evans	2001	-	46.5 - 51.0	-
Faas	2001	37.0 - 42.2	-	45.3 - 48.9
Richardson et al.	2001	-	36.0 - 39.9	-
Chuhan et al.	2002	24.8 - 32.5	44.5 - 48.8	-
Tang et al.	2002	37.2	-	39.9
U.S. Army Corps of Engineers	2002	25	40	50
Wheatcroft	2002	-	37.8	-
Curry et al.	2004	39.3	-	51.2
Van Rijn	2007	-	35	-
Briggs et al.	2010	-	36.6	-
Reed et al.	2010	-	36.7 - 43.6	-
Román-Sierra et al.	2013	-	25.6 – 43.4	-
Averaged historical porosities		**35.0**	**40.6**	**45.9**

Table 5
Median grain size and sorting parameter values for native, borrow and final mixture Master sand samples.

	Native beach sand		Borrow marine sand		Final mixture	
	D_{50} (mm-phi)	Sorting (phi)	D_{50} (mm-phi)	Sorting (phi)	D_{50} (mm-phi)	Sorting (phi)
Victoria	0.24 - 2.06	0.81	0.32 -1.64	0.88	0.24 - 2.06	0.92
Camposoto	0.27 -1.89	1.12	0.32 -1.64	0.88	0.29 - 1.79	1.25
Atunara	0.59 - 0.76	1.32	0.37 - 1.43	1.26	0.49 - 1.03	1.31

Table 6
Density, humidity and porosity results for Victoria beach sand and observations.

DATE	ZONE	DENSITY (Kg/m^3)	HUMIDITY (%)	POROSITY (%)	OBSERVATIONS
29 days before P1 nourishment	P1 A	1670	2.8	37.0	Original state.
	P1Mberm	-	-	-	
	P1 M	1756	17.2	33.7	
	P1 B	1759	19.2	33.6	
35 days before P2 nourishment	P2 A	1617	2.0	39.0	
	P2 Mberm	-	-	-	
	P2 M	1730	18.0	34.7	
	P2 B	1696	20.0	36.0	
P1 nourishment	P1 A	1686	6.1	36.4	Profile 1 newly nourished.
	P1Mberm	1605	4.4	39.4	
	P1 M	1652	24.3	37.7	
	P1 B	1659	22.5	37.4	
6 days before P2 nourishment	P2 A	1613	6.0	39.1	A new point P1Mberm is established.
	P2 Mberm	-	-	-	
	P2 M	1703	20.6	35.7	
	P2 B	1695	21.2	36.0	
1 day after P1 nourishment	P1 A	1613	4.6	39.1	After the effect of first tidal cycle on P1.
	P1Mberm	1539	4.2	41.9	
	P1 M	1665	22.4	37.2	
	P1 B	1660	22.8	37.4	
5 days before P2 nourishment	P2 A	1658	4.4	37.4	Profile 2 still have not been nourished.
	P2 Mberm	-	-	-	
	P2 M	1697	21.5	36.0	
	P2 B	1673	24.1	36.9	
6 days after P1 nourishment	P1 A	1541	4.7	41.8	Profile 2 newly nourished.
	P1Mberm	1589	3.1	40.0	
	P1 M	1705	21.5	35.7	
	P1 B	1660	24.5	37.4	
P2 nourishment	P2 A	1705	4.4	35.7	The new point P2Mberm is established.
	P2 Mberm	1593	7.5	39.9	
	P2 M	1601	25.3	39.6	
	P2 B	1680	21.9	36.6	
7 days after P1 nourishment	P1 A	1534	3.4	42.1	After the effect of several tidal cycles on P1.
	P1Mberm	1532	4.0	42.2	
	P1 M	1697	22.8	36.0	
	P1 B	1665	22.9	37.2	
1 day after P2 nourishment	P2 A	1649	3.9	37.8	After the effect of the first tidal cycle on P2.
	P2 Mberm	1494	6.8	43.6	
	P2 M	1661	22.1	37.3	
	P2 B	1643	23.7	38.0	
21 days after P1 nourishment	P1 A	1602	3.0	39.5	After the effect of the equinocctial tides
	P1Mberm	1672	4.5	36.9	(tidal range coeff. = 1.12) on P1 and P2.
	P1 M	1656	21.6	37.5	
	P1 B	1694	22.5	36.1	
15 days after P2 nourishment	P2 A	1670	2.7	37.0	
	P2 Mberm	1536	2.9	42.0	
	P2 M	1678	20.5	36.7	
	P2 B	1653	22.5	37.6	
52 days after P1 nourishment	P1 A	1591	2.8	40.0	1 month after equinoctial tides.
	P1Mberm	1576	5.4	40.5	
	P1 M	1663	23.1	37.2	
	P1 B	1722	14.9	35.0	
46 days after P2 nourishment	P2 A	1656	2.8	37.5	
	P2 Mberm	1586	2.8	40.2	
	P2 M	1652	21.8	37.7	
	P2 B	1625	21.1	38.7	
241 days after P1 nourishment	P1 A	1622	2.8	38.8	After storms (Hs = 4 m).
	P1Mberm	-	-	-	
	P1 M	1657	22.5	37.5	
	P1 B	1742	17.3	34.3	
235 days after P2 nourishment	P2 A	1632	3.3	38.4	
	P2 Mberm	1609	5.5	39.3	
	P2 M	1644	20.7	38.0	
	P2 B	1681	18.5	36.6	
452 days after P1 nourishment	P1 A	1640	1.9	38.1	After storm (Hs = 4 m).
	P1Mberm	1549	2.3	41.5	
	P1 M	1685	20.7	36.4	
	P1 B	1693	20.0	36.1	
446 days after P2 nourishment	P2 A	1668	2.1	37.1	
	P2 Mberm	1650	2.2	37.7	
	P2 M	1632	22.4	38.4	
	P2 B	1619	23.2	38.9	

fractions (larger than 2, 1, 0.71, 0.5, 0.35, 0.25, 0.12 mm, and smaller than 0.12 mm) were subsequently weighed using a 0.01 g precision balance. After each analysis, the sieve weight, retained percentage, percentage passing, analysis liability, granulometric curve and histogram with trend line for each sieve were computed according to Román-Sierra et al. (2013). By following the methodology used by Muñoz-Perez et al. (2012) and Navarro et al. (2011), the accurate profile topography was obtained by using DGPS during data processing.

Wave data values were obtained from the deep water Cádiz triaxys buoy 1320 (36.50 N; 6.33 W) in the Atlantic Ocean (Muñoz-Perez et al., 2001b) for Victoria and Camposoto beaches (Fig. 1) and from WANA point 2006009 (36.13 N; 5.15 W) in the Mediterranean Sea for Atunara beach (Spanish Port System, 2012).

3.4. Accuracy and precision of the methodology

The accuracy of the analysis presented here depends on the beach heterogeneity, whereas the precision of the analysis, which is the reproducibility of the results, depends on the reliability of the surveying device. First, the error associated with sand beach heterogeneity was assessed by comparing the results obtained from five equally spaced registers collected in the same small area (1x1 m^2). Second, the errors

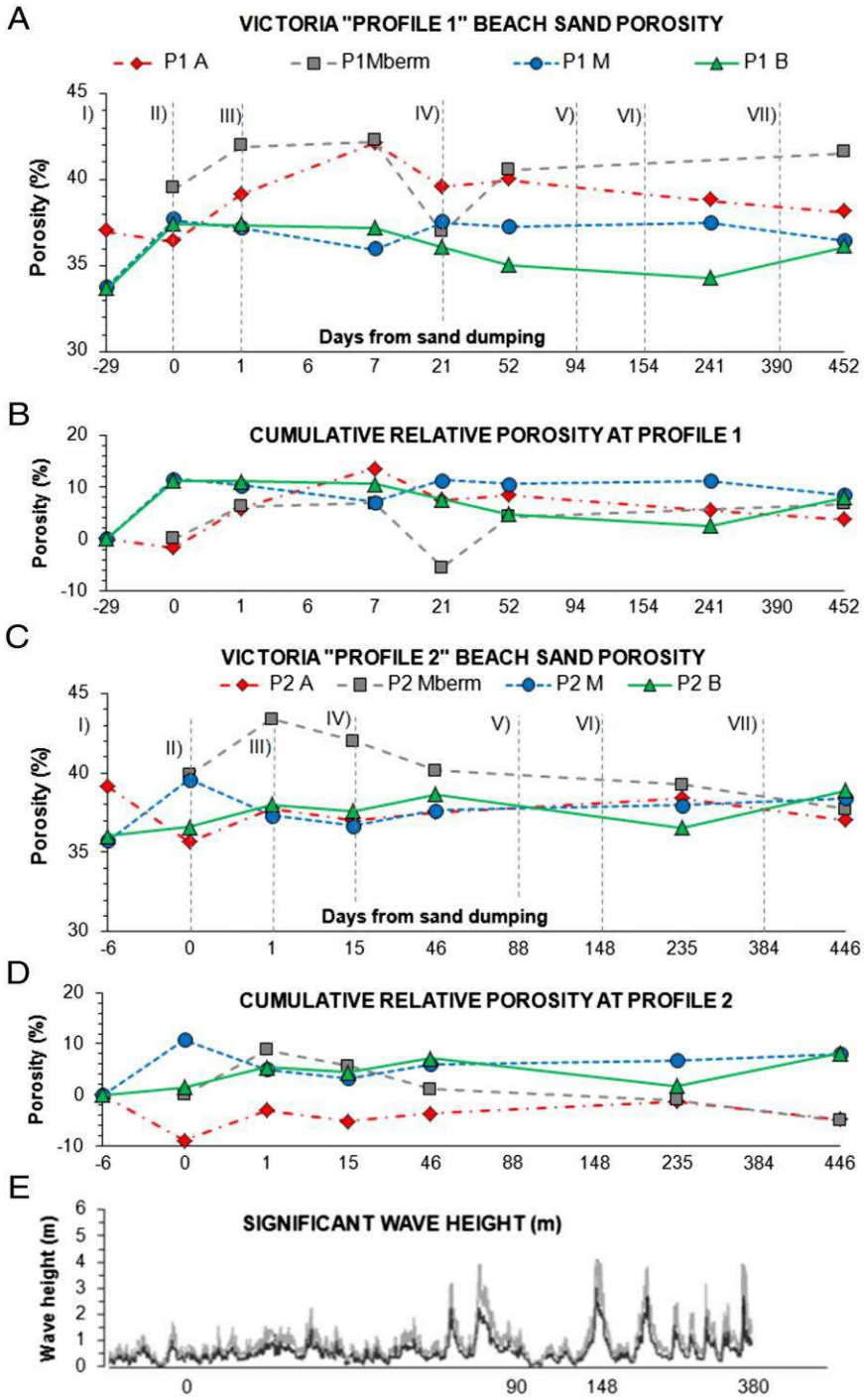


Fig. 3. Victoria beach sand porosity monitoring (D_{50} = 0.24 mm; tidal range = 3.6 m; seaside promenade). A) porosity variability at profile 1; B) cumulative relative porosity at profile 1; C) porosity variability at profile 2; D) cumulative relative porosity at profile 2; E) significant wave height (Hs). Notation: I) natural state; II) immediately after profile nourishment; III) after 12 h; IV) after equinoctial tides; V) storm Hs = 4 m; VI) storm Hs = 4 m; VII) storm Hs = 4 m.

linked to the density gauge were assessed by repeatedly registering the same point several times. Through this procedure, the variability associated with the nuclear densimeter method was determined. This determination was possible because the density gauge does not disturb the sediment bed (Roberts et al., 1998). Tests were also conducted at both supratidal and intertidal sites in order to estimate the influence of humidity. In all cases, the mean, standard deviation, maximum absolute error and maximum relative error of density (kg/m^3) and porosity (%) data were calculated. The maximum absolute and relative errors are expressed as follows:

$$\text{Max. Abs. Error}\left(\text{kg/m}^3\right) = (\text{Max. value} - \text{Min. value}) \quad (5)$$

$$\text{Max. Rel. Error}\ (\%) = [1 - (\text{Min. value}/\text{Max. value})] \cdot 100 \quad (6)$$

4. Results

The results obtained from the studied beaches are presented here and are compared with the literature. Previously, the precision of the method related to both sand beach heterogeneity and the nuclear density gauge was also analysed.

4.1. Modified Proctor test

To determine the behaviours of native and borrowed sands under the same energetic conditions, the maximum densities and optimal humidities for the three studied beaches are presented in Table 1. In general, the maximum density of native sand was slightly greater than that of borrowed sand, with relative differences of +1.2, +3.3 and +8.4% at Victoria, Camposoto and Atunara beaches, respectively.

4.2. Errors

To estimate the error introduced in the field density analyses, five registers were taken in a small area (1x1 m^2). An inter-tidal locality was selected at the Victoria beach profile (P2M). The density and porosity values were determined following the aforementioned methodology. The density and porosity results of the analyses indicated maximum relative errors of 0.9 and 1.6%, respectively (Table 2).

To determine the precision (i.e., the reproducibility of the results) of the applied methodology, the same point was analysed five times at the dry beach (P2A) and the intertidal beach (P2M). At both sites, similar density and porosity values were obtained, with maximum relative errors of 1.3 and 2.2%, respectively (Table 3), which is of the same order of magnitude as in the heterogeneity case. As a matter of fact, Dickinson and Ward (1994) and Roberts et al. (1998) obtained similar errors, which are related to the accuracy of the method for determining sand porosity.

According to data published by several authors (Table 4) who employed a variety of different methodologies, beach sand porosity values range from 19.6 to 66% (a variability of 46.4%). The average porosities of historically studied natural, loose and packed sands are 35, 40.6 and 45.9%, respectively, with a range of grain sizes (from 0.07 to 2.54 mm) and sorting coefficients (from 1.05 to 4.2). USACE (2002) states that the porosity ranges from 25% to 50% in natural sand (2 – 0.063 mm) and does not directly depend on grain size but that it is sensitive to the sediment grain shape, roughness angularity and sorting (Dickinson and Ward, 1994). According to Reis and Gama (2010), Soulsby (1991) and Van Rijn (2007), the porosity of a pure marine sand bed is around 35%. However, other recent studies (Briggs et al., 2010; Reed et al., 2010; Tang et al., 2002; Wheatcroft, 2002) have recorded a variety of marine sand porosities, obtained via different techniques, ranging from 36.6 to 43.6% for quartz sands comprised of up to 98% sand particles (a composition very similar to that of the beaches on the Gulf of Cadiz).

4.3. Results for Victoria beach

The native Victoria beach sand master sample was composed of medium sand with a median grain diameter (D_{50}) of 0.24 mm (2.06 phi), corresponding to a moderately sorted sand (sorting = 0.81 phi). Although the offshore borrow sand had a D_{50} of 0.32 mm (1.64 phi), it was also classified as moderately sorted (sorting = 0.88 phi). The final master sample (Medina et al., 1994) collected after the completion

Table 7
Density, humidity and porosity results for Camposoto beach sand and observations.

DATE	ZONE	DENSITY (Kg/m^3)	HUMIDITY (%)	POROSITY (%)	OBSERVATIONS
37 days before P1	P1 A	1738	2.9	34.4	Natural State.
nourishment	P1 M	1809	16.0	31.7	
	P1 B	1714	20.8	35.3	
5 days before P2	P2 A	1846	2.9	30.3	
nourishment	P2 M	1757	18.2	33.7	
	P2 B	1695	20.2	36.0	
32 days before P1	P1 A	1800	1.1	32.1	Profile 1 newly
nourishment	P1 M	1868	16.0	29.5	nourished.
P2 nourishment	P1 B	1738	19.6	34.4	P1 still have not
	P2 A	1585	3.9	40.2	been nourished.
	P2 M	1676	18.6	36.8	
	P2 B	1601	23.6	39.6	
2 days before P1	P1 A	-	-	-	P1 was been
nourishment	P1 M	-	-	-	nourished at
	P1 B	-	-	-	that moment.
1 day after P2	P2 A	1613	4.3	39.1	
nourishment	P2 M	1685	17.2	36.4	
	P2 B	1621	22.6	38.8	
P1 nourishment	P1 A	1686	5.3	36.4	Profile 0 newly
	P1 M	1700	19.8	35.8	nourished. After
	P1 B	1702	21.6	35.8	the effect of the
3 days after P2	P2 A	1642	3.8	38.0	first tidal cycles
nourishment	P2 M	1652	12.8	37.7	on P1.
	P2 B	1676	21.8	36.8	
1 day after P1	P1 A	1632	3.3	38.4	After the effect
nourishment	P1 M	1673	21.0	36.9	of the first tidal
	P1 B	1712	21.0	35.4	cycles on P1.
4 days after P2	P2 A	1603	4.5	39.5	
nourishment	P2 M	1588	17.8	40.1	
	P2 B	1669	21.5	37.0	
25 day after P1	P1 A	1675	2.7	36.8	After the effect of
nourishment	P1 M	1641	18.3	38.1	the equinocctial
	P1 B	1741	19.4	34.3	tides (tidal range
28 days after P2	P2 A	1662	3.3	37.3	coeff. = 1.12) on
nourishment	P2 M	1628	15.6	38.6	P1 and P2.
	P2 B	1657	20.4	37.5	
64 day afterP1	P1 A	1747	19.5	34.1	64 days after
nourishment	P1 M	1703	22.2	35.7	nourishing and
67 days after P2	P1 B	1672	4.2	36.9	25 days after
nourishment	P2 A	1615	4.6	39.1	beach works.
	P2 M	1677	11.6	36.7	
	P2 B	1659	21.1	37.4	
112 day after P1	P1 A	1764	13.0	33.4	After short storm
nourishment	P1 M	1688	21.2	36.3	(Hs = 4 m).
	P1 B	-	-	-	
115 days after P2	P2 A	1712	14.9	35.4	
nourishment	P2 M	1708	19.4	35.5	
	P2 B	-	-	-	
257 day after P1	P1 A	1747	2.0	34.1	After storms
nourishment	P1 M	1689	19.3	36.3	(Hs = 4 m)
	P1 B	1777	14.6	32.9	
260 days after P2	P2 A	1697	3.0	36.0	
nourishment	P2 M	1767	16.7	33.3	
	P2 B	1689	16.1	36.3	
467 day after P1	P1 A	1742	3.5	34.3	After storm
nourishment	P1 M	1643	21.0	38.0	(Hs = 4 m).
	P1 B	1727	20.5	34.8	
470 days after P2	P2 A	1717	3.5	35.2	
nourishment	P2 M	1789	12.5	32.5	
	P2 B	1689	21.0	36.3	

of beach nourishment works exhibited the following values: $D_{50} = 0.24$ mm (2.06 phi) and sorting = 0.92 phi (Table 5). All of the density, humidity and porosity results from Victoria beach can be found in Table 6.

The porosity of the native Victoria beach sand ranged from 34 to 39% (Fig. 3A and C). In the short term, immediately after sand dumping (Volume density = 100 m^3/m), the porosity remained practically constant at the dry beach in both profiles but increased drastically at P1M (+11.6%), P1B (+11.2%) and P2M (+10.8%). After the first tidal cycle (12 h), the porosity increased at the dry beach and at the new points P1Mberm (+6.3%) and P2Mberm (+8.8%), remained practically constant at the low tidal zones, and decreased by 5.7% at P2M. One week after sand dumping, the porosity increased at P1A (+7.6%), decreased at P1M (−3.2%) and did not change at P1Mberm and P1B. Furthermore, the equinoctial tides (i.e., the highest tidal range of the year, with a coefficient (Godin, 1972) of 1.12, which happened 14 days after the nourishment activities) decreased the porosity; the maximum relative difference was −12.5% at P1Mberm. In the long term, all porosity values decreased to reach the native values of the sand beach, although the porosity increased again by 5.4% and 6.4% at P1B and P2B, respectively, after the last storm (Hs = 4 m) happened 400 days after the works (Fig. 3E). The cumulative variability curves (Fig. 3B and D) demonstrate

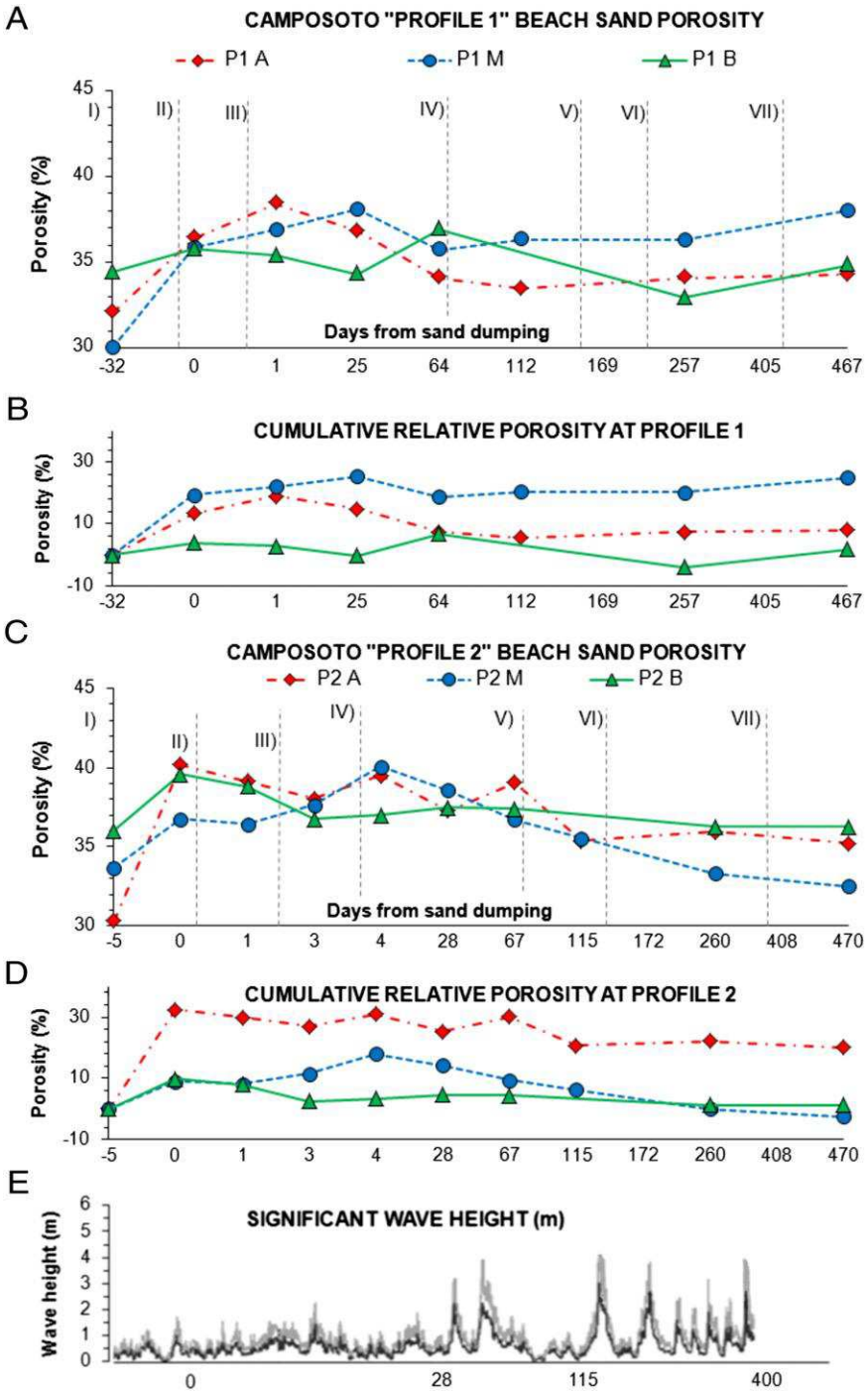


Fig. 4. Camposoto beach sand porosity monitoring ($D_{50} = 0.24$ mm; tidal range = 3.6 m; backshore dune ecosystem). A) porosity variability at profile 1; B) cumulative relative porosity at profile 1; C) porosity variability at profile 2; D) cumulative relative porosity at profile 2; E) significant wave height (Hs). Notation: I) natural state; II) immediately after profile nourishment; III) after 24 h; IV) after equinoctial tides; V) storm Hs = 4 m; VI) storm Hs = 4 m; VII) storm Hs = 4 m.

that the porosity typically recovered its native value eight months after beach nourishment. The high variability of the porosity in the short term (after sand dumping) was important, and the porosity ranged from 33% to 42% in profile 1 (Fig. 3A).

4.4. Results for Camposoto beach

The native Camposoto beach master sample corresponded to a medium sand, with poorly sorted grains (sorting = 1.12 phi) of mean size 0.27 mm (1.89 phi). The borrow sand was the same as that employed for Victoria beach nourishment. At the end of the study period, the sediment exhibited the following values: D_{50} = 0.29 mm (1.79 phi) and sorting = 1.25 phi (Table 5). Sand density, humidity and porosity results obtained for this beach are presented in Table 7.

The native sand in Camposoto beach had porosity values between 30% and 40% (Fig. 4A and C). In the short term, after sand dumping (Volume density = 120 m^3/m), all these porosity values increased, with maximum relative differences of +19.3% and +32.5% at P1M and P2A, respectively. The maximum porosity variability ranged from 30% to 40% in profile 2 (Fig. 4C). During the first two tidal cycles (24 h), the porosity continued to increase slightly, with relative differences of less than +5.6% but +26.8 and +18.9% at P1M and P2M, respectively (after 25 days). The cumulative effect of several tides and the equinoctial tides in the medium term caused a first decrease of 6% of the porosity at P2A. Despite the storms (Fig. 4E) that occurred in the long term (110 and 170 days after sand dumping, with Hs = 5 and 4 m, respectively), the porosity continued to decrease in both profiles. Moreover, P2M decreased at the last stage, with a cumulative relative difference of porosity loss of −18.9% regarding the maximum value (Fig. 4C and D). Typically, the porosities reached the native values of the sand beach after eight months. At the end of the study period, the porosity values at P2A and P1A were approximately constant and exhibited values similar to the original range.

4.5. Results for Atunara beach

Atunara is a microtidal beach originally composed of coarse (D_{50} = 0.59 mm, 0.76 phi) and poorly sorted sands (sorting = 1.32 phi). The borrow material used was a poorly sorted (sorting = 1.26 phi) medium sand, with a value of D_{50} equal to 0.37 mm (1.43 phi). The final collected master sample was found to be a medium and coarse sand (D_{50} = 0.49 mm = 1.03 phi) with poor sorting (1.31 phi) (Table 5). Sand density, humidity and porosity results for this beach are presented in Table 8.

The original porosities in Atunara beach were found to be less than those at the Atlantic beaches and ranged from 25.6% to 35.7% (Fig. 5A and C). These low porosities, especially at "B" zones, seemed to be produced by poorly sorted sand (Beard and Weyl, 1973; USACE, 2002), where the small grains can fit into the pore spaces of the large grains. Immediately after sand dumping (Volume density = 150 m^3/m), the porosity exhibited maximum percentage increases of 16.7%, 25.8% and 36.2% at the "A", "M" and "B" zones, respectively. In the short term the maximum porosity variability ranged from 30% to 40% in profile 2 (Fig. 5C). In the medium term, the porosity increased at P2B and reached a value of 41.4% (+47.7% accumulated from the original values), whereas the porosities decreased by approximately 14% at P1M and P1B and remained at their native values in the long term. Eight months after the nourishment activities, the porosities decreased by 20.1% and 33.0% (at P2M and P2B, respectively) and attained their original values, whereas the dry beach porosity was approximately stable during the entire research period after the nourishment activities (Fig. 5B and D). The porosity values at the M and B zones exhibited similar behaviour, although the porosity variability registered at P2 was greater than that at P1.

Table 8
Density, humidity and porosity results for Atunara beach sand and observations.

DATE	ZONE	DENSITY (Kg/m3)	HUMIDITY (%)	POROSITY (%)	OBSERVATIONS
57 days before beach nourishment	P1A	1770	4.1	33.2	Natural state.
	P1M	1800	2.4	32.1	
	P1B	1929	4.8	27.2	
	P2A	1703	4.0	35.7	
	P2M	1737	2.6	34.5	
	P2B	1971	8.8	25.6	
Beach nourishment	P1A	1623	3.3	38.8	Just after nourishing works.
	P1M	1581	13.1	40.3	
	P1B	1837	8.9	30.7	
	P2A	1751	3.0	33.9	
	P2M	1601	3.3	39.6	
	P2B	1725	14.7	34.9	
41 days after beach nourishment	P1A	1675	2.6	36.8	After storm (Hs = 4 m).
	P1M	1525	3.9	42.5	
	P1B	1553	4.5	41.4	
	P2A	1623	3.3	38.8	
	P2M	1746	3.6	34.1	
	P2B	1825	8.0	31.1	
252 days after beach nourishment	P1A	1649	3.5	37.8	After storm (Hs = 3 m).
	P1M	1751	3.1	33.9	
	P1B	1915	6.1	27.7	
	P2A	1628	3.2	38.6	
	P2M	1670	4.6	37.0	
	P2B	1859	10.5	29.8	

The topographic profiles of the three beaches (at the original state, immediately after sand dumping and 1 year after the beach nourishment) are shown in Fig. 6. In the long term, topographic levelling generally recovered its natural slope one year after the nourishment activities.

5. Discussion

The modified Proctor compaction test indicated that the potential compression (i.e., maximum density) of borrowed sand was slightly less than that of native sand. This fact could be an important factor in understanding porosity variability.

The accuracy of this methodology, which is used to study sand beach heterogeneity and the repetitiveness of the use of the nuclear densimeter gauge, has been estimated by different surveying tests. The maximum relative errors in the density and porosity measurements were approximately 1 and 2%, respectively. This error is considered negligible compared with the values of the variability of natural sand porosity that have been presented in the literature (±46.4%).

Considering the standard assumption that the porosity of (non-cohesive) beach sand is around 40%, absolute sand porosity varied between 25.6 and 43.4% for the three beaches in this study. At Victoria and Camposoto beaches, the porosity variability was 10% over the course of the study period, whereas at Atunara was 15% with maximum relative and cumulative differences in the order of ±40% over several terms (Fig. 5D).

An important increase in the porosity values was detected immediately after sand dumping at the three beaches. Afterwards, the marine influence (primarily tides and swell waves) produced a gradual decrease in the porosities over several terms until they reached the values of the original beach sand eight months after the nourishment activities. Therefore, the constant effect of swell waves and tides seem to be a key determinant of porosity variability. Most changes were found at zones affected by the tidal range. Thus, the tidal range can be an important clue for controlling the natural depositional porosity of unconsolidated sands. Nevertheless, there is no clear relation between storm waves and porosity changes, and this relationship should be studied in future researches.

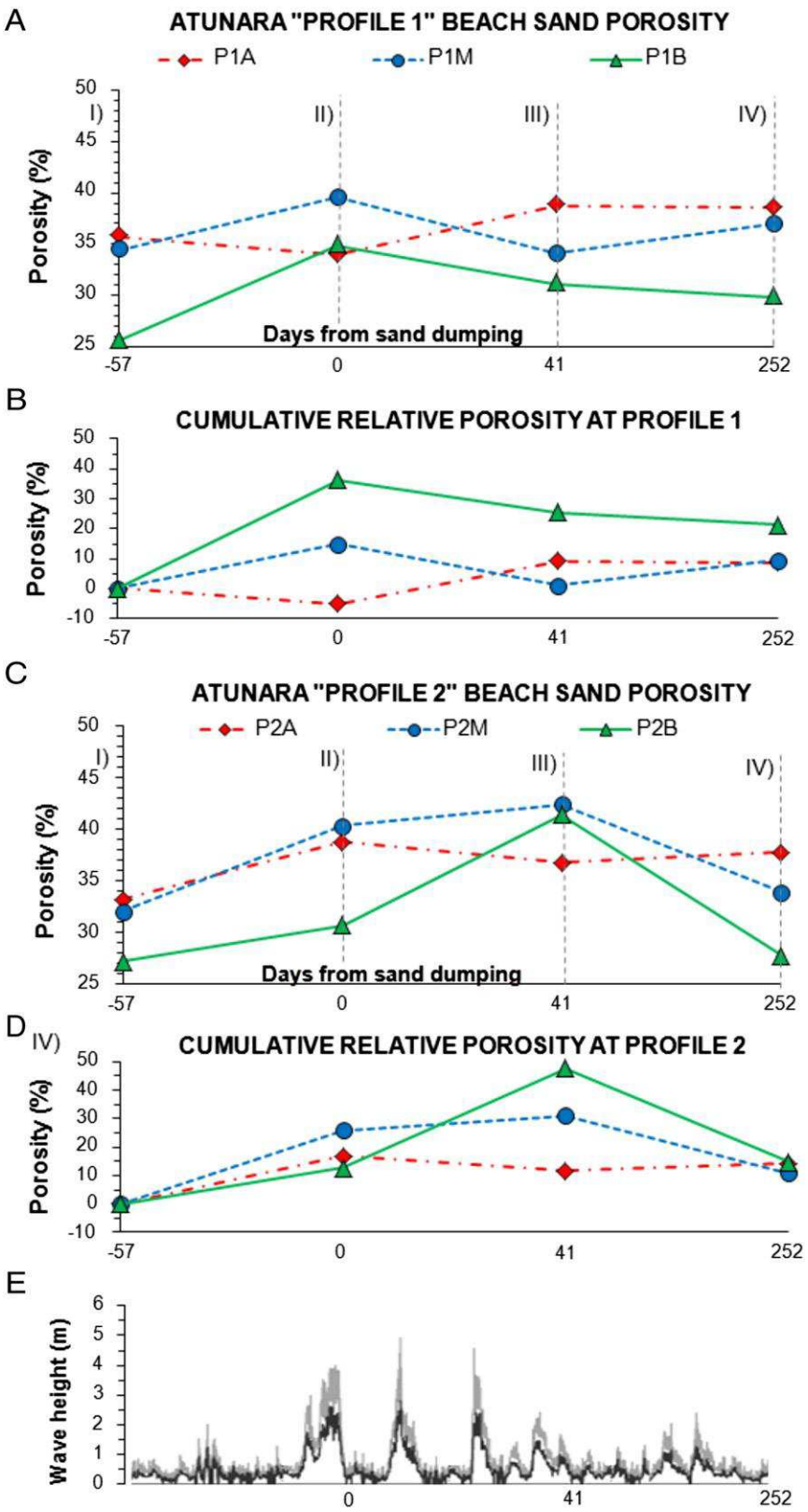


Fig. 5. Atunara beach sand porosity monitoring (D_{50} = 0.49 mm; tidal range = 1.5 m; seaside promenade and transverse breakwaters): A) porosity variability at profile 1; B) cumulative relative porosity at profile 1; C) porosity variability at profile 2; D) cumulative relative porosity at profile 2; E) significant wave height (Hs). Notation: I) natural state; II) immediately after profile nourishment; III) after storm Hs = 4 m; IV) after storm Hs < 3 m.

The porosity values obtained from this methodology are consistent and compare well with other data reported from several sources. The consulted literature supports the high porosity variability exhibited by the beaches studied.

6. Conclusions

This research has demonstrated that it is possible to measure the in-situ bulk density on sandy beaches using a nuclear densimeter gauge

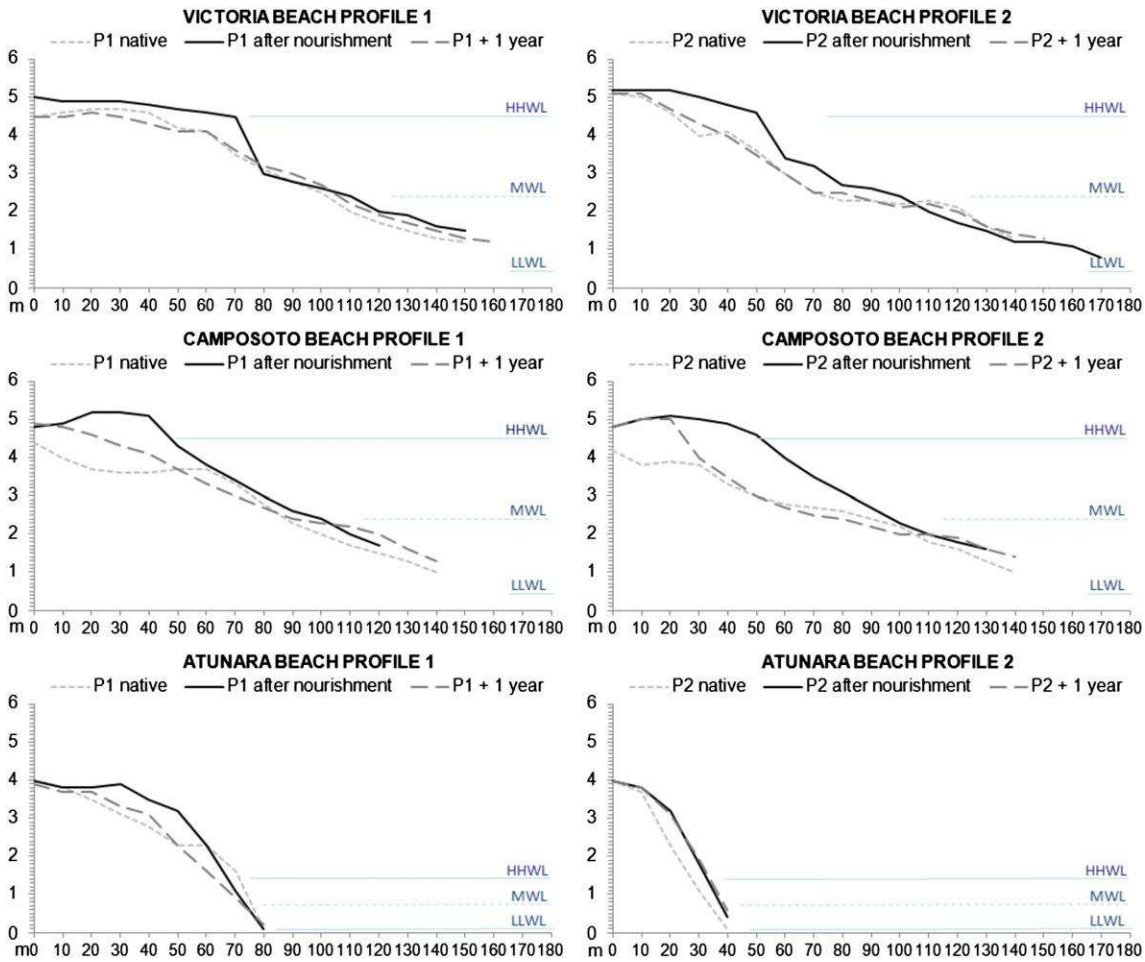


Fig. 6. Topographic profiles of the Victoria, Camposoto and Atunara beaches in their original states, immediately after sand dumping, and 1 year after beach nourishment. HHWL: highest high-water level; MWL: medium water level; LLWL: lowest low-water level.

and, therefore, to accurately compute the porosity. From a technical and economical point of view, this method is rapid, cheap and non-destructive. The modified Proctor test enabled the maximum density of several sands to be determined, with different degrees of compression recorded at the same incident energy level. This ability could represent an important factor in understanding porosity variability. Both techniques can be considered coastal engineering support tools with which to better understand changes in sand volume.

The methodology proposed in this paper exhibits maximum relative errors in the density and porosity measurements of 1.3 and 2.2%, respectively.

The variation in porosity of beach sand in the present study was found to range from 25.6 to 43.4% for the three analysed beaches, with maximum relative and cumulative differences in the order of ±40% after beach nourishment for different terms and localities. These findings suggest that the previous assumption of 40% porosity for natural (non-cohesive) sand beds should be considered only a crude guideline.

In general terms, a very significant increase in the porosity was observed after massive sand dumping, with maximum relative differences of +11.6%, +32.5% and +36.2% in Victoria, Camposoto and Atunara beaches, respectively.

The effect of the first tidal cycle (12–24 h) had a minimal effect on the nourished sand porosity at the tidal areas of Victoria and Camposoto beaches. Nevertheless, the cumulative effect of daily tides and equinoctial tides exhibited relative porosity forfeitures of as much as −18.9%.

For the three studied beaches, sand porosities tended to decrease with time, returning to native values approximately eight months after sand dumping. Moderate storms generally had no significant effect on porosity variability, although no clear relationship was observed between storm waves and porosity changes. Future research should examine the influence of storm waves and season on sand porosity and associated volume changes, as well as the effects of specific grain density, grain shape, grain size, sorting, skewness, kurtosis and water content.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers, whose constructive comments helped to enhance this paper, as well as all the members of the Coastal Engineering research group (RNM-912) for their contribution towards the completion of this project.

References

Anfuso, G., 2005. Sediment-activation depth values for gentle and steep beaches. Mar. Geol. 220, 101–112.

Arulanandan, K., 1991. Dielectric method for prediction of porosity of saturated soil. J. Geotech. Eng. 117, 319–330.

ASTM Standard D1557, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)). ASTM International, West Conshohocken, PA. http://dx.doi.org/10.1520/D1557-12.

ASTM Standard D6938, 2010. Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International, West Conshohocken, PA. http://dx.doi.org/10.1520/D6938-10.

Atkins, J.E., McBride, E.F., 1992. Porosity and packing of Holocene river, dune, and beach sands. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 76, 339–355.

Beard, D.C., Weyl, P.K., 1973. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 57, 349–369.
Bennett, R.H., 1999. Panama City coastal sands DRI sites 10 and GS-172 sediment analyses. SEAPROBE, Inc (Technical Report No. SI-0099-03).
Bennett, R.H., Thwaites, F., Hulbert, M.H., Hulbert, M.E., 1999. Final report part I. NATO phase II field exercise in the C-1 area off the coast of Holland. SEAPROBE, Inc (Technical Report No. SI-0099-01).
Bloom, M., Russell, M.J., Kustau, A., Mandayam, S., Sukumaran, B., 2010. Measurement of porosity in granular particle distributions using adaptive thresholding. IEEE Trans. Instrum. Meas. 59, 1192–1199.
Breslau, L.R., 1967. The normally-incident reflectivity of the sea floor at 12KC and its correlation with physical and geological properties of naturally-occurring sediments. Technical Report Reference No. 67–16.Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts.
Briggs, K.B., 1994. High-frequency acoustic scattering from sediment interface roughness and volume inhomogeneities. Dissertation, University of Miami, Coral Gables, Florida.
Briggs, K.B., Reed, A.H., Jackson, D.R., Tang, D., 2010. Fine-scale volume heterogeneity in a mixed sand/mud sediment off Fort Walton Beach FL. IEEE J. Ocean. Eng. 35, 471–487.
Chuhan, F.A., Kjeldstad, A., Bjørlykke, K., Høeg, K., 2002. Porosity loss in sand by grain crushing - Experimental evidence and relevance to reservoir quality. Mar. Pet. Geol. 19, 39–53.
Curry, C.W., Bennett, R.H., Hulbert, M.H., Curry, K.J., Faas, R.W., 2004. Comparative study of sand porosity and a technique for determing porosity of undisturbed marine sediment. Mar. Georesour. Geotechnol. 22, 231–252.
Davies, J.L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. Z. Geomorphol. Mortensen Sonderh 8, 127–142.
Dean, R.G., 2003. Beach nourishment: theory and practice. Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific Publishing Company, River Edge, New Jersey (399 pp.).
Dickinson, W.W., Ward, J.D., 1994. Low depositional porosity in eolian sands and sandstones, Namib Desert. J. Sediment. Res. A Sediment. Petrol. Process. 64 (A), 226–232.
Ellis, A.J., Lee, C.H., 1919. Geology and Groundwater of the Western part of San Diego County California. U. S. Geol. Surv. Water Supply Pap. 446, 3–131.
Erchul, R.A., 1974. OCEAN ENGINEERING APPLICATIONS FOR ELECTRICAL RESISTIVITY TECHNIQUES. 733–746.
Erchul, R.A., Nacci, V.A., 1972. Electrical Resistivity Measuring System for Porosity Determination of Marine Sediments. Mar. Technol. Soc. J. 6, 47–53.
Evans, R.L., 2001. Measuring the shallow porosity structure of sediments on the continental shelf: A comparison of an electromagnetic approach with cores and acoustic backscatter. J. Geophys. Res. C: Oceans 106, 27047–27060.
Faas, R.W., 2001. Report on research concerning sediment porosity. University of Southern Mississippi, Stennis Space Center, MS. 39529.
Ferreira, O., Ciavola, P., Taborda, R., Bairros, M., Dias, J.A., 2000. Sediment mixing depth determination for steep gentle foreshores. J. Coast. Res. 16, 830–839.
Fraser, H.J., 1935. Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. J. Geol. 43, 910–1010.
Gaither, A., 1953. A study of porosity and grain relationships in experimental sands. J. Sed. Res. (SEPM) 23, 180–195.
Galvin, C.J., 1979. Relation between immersed weight and volume rates of longshore transport. U.S.Army Coastal Engineering Research Center (Technical Paper).
Godin, G., 1972. The Analysis of Tides. University of Toronto Press, Toronto Ontario (264 pp.).
Gomez-Pina, G., Fages, L., Ramírez, J.L., Muñoz-Pérez, J.J., Enríquez, J., 2007. A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. Proc. Coast. Eng. Conf. 4167–4178.
Graton, L.C., Fraser, H.J., 1935. Systematic packing of spheres-with particular relation to porosity and permeability. J. Geol. 43, 785–909.
Hamilton, E.L., Bachman, R.T., 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. J. Acous. Soc. Am. 72, 1891–1904.
Hamilton, E.L., Menard, H.W., 1956. Density and porosity of sea-floor surface sediments off San Diego California. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 40, 754–761.
Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., Stive, M.J.F., 2002. A summary of European experience with shore nourishment. Coast. Eng. 47, 237–264.
Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H.H., Hamm, L., Laustrup, C., Lechuga, A., Spanhoff, R., 2002. Beach nourishment projects, practices, and objectives - A European overview. Coast. Eng. 47, 81–111.
Jackson, P.D., 1975. Electrical resistivity method for evaluating the in-situ porosity of clean marine sands. Mar. Geotechnol. 1, 91–115.
Jackson, P.D., Smith, D.T., Stanford, P.N., 1978. Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands. Geophysics 43, 1250–1268.
Kakinoki, T., Tsujjimoto, G., Yamada, F., Sakai, D., Uno, K., 2011. Beach profile and sediment characteristics of a mixed sand beach under diurnal sea level variations. J. Coast. Res. 765–770.
Kamphuis, J.W., Davies, M.H., Nairn, R.B., Sayao, O.J., 1986. Calculation of littoral sand transport rate. Coast. Eng. 10, 1–21.
King, F.H., 1899. The principles and conditions of the movements of ground water. 19th Annual Report of the USGS (1897–1898).
Kolbuszewski, J.J., 1948. An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands. Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam 1, pp. 158–165.
Ludwick, J.C., 1956. A volumeter for measuring porosity of incoherent sands. J. Sediment. Petrol. 26, 276–283.
Lundegard, P.D., 1992. Sandstone porosity loss - a "big picture' view of the importance of compaction. J. Sediment. Petrol. 62, 250–260.
Masselink, G., Short, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. J. Coast. Res. 9, 785–800.
McLachlan, A., Turner, I., 1994. The interstitial environment of sandy beaches. Mar. Ecol. 15, 177–211.
Medina, R., Losada, M.A., Losada, I.J., Vidal, C., 1994. Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. Mar. Geol. 118, 195–206.
Meinzer, O.E., 1923. The occurrence of ground water in the United States. U. S. Geol. Surv. Water Supply Pap. 489, 11–17.
Muñoz-Pérez, J.J., Medina, R., 2000. Profile changes due to a fortnightly tidal cycle. Coastal Engineering 2000 - Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, ICCE 2000 276, pp. X3062–X3075.
Muñoz-Perez, J.J., Medina, R., 2010. Comparison of long-, medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control. Coast. Eng. 57, 241–251.
Muñoz-Perez, J.J., Lopez De San Roman-Blanco, B., Gutierrez-Mas, J.M., Moreno, L., Cuena, G.J., 2001. Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain). Coast. Eng. 42, 143–153.
Muñoz-Pérez, J.J., Medina, R., Tejedor, B., 2001. Evolution of longshore beach contour lines determined by the E.O.F. method. Sci. Mar. 65, 393–402.
Muñoz-Perez, J.J., Payo, A., Roman-Sierra, J., Navarro, M., Moreno, L., 2012. Optimization of beach profile spacing: An applicable tool for coastal monitoring. Sci. Mar. 76, 791–798.
Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Tsoar, H., Rodríguez, I., Gómez-Pina, G., 2011. Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. Geomorphology 129, 14–28.
Packwood, A.R., 1983. The influence of beach porosity on wave uprush and backwash. Coast. Eng. 7, 29–40.
Poizot, E., Anfuso, G., Méar, Y., Bellido, C., 2013. Confirmation of beach accretion by grain-size trend analysis: Camposoto beach, Cádiz, SW Spain. Geo-Mar. Lett. 1–10.
Pryor, W.A., 1972. Reservoir Inhomogeneities of some Recent Sand Bodies. Soc. Petrol. Eng. J. 12, 229–245.
Pryor, W.A., 1973. Permeability-Porosity Patterns and Variations in some Holocene Sand Bodies. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 57, 162–189.
Reed, A.H., Thompson, K.E., Briggs, K.B., Willson, C.S., 2010. Physical pore properties and grain interactions of SAX04 sands. IEEE J. Ocean. Eng. 35, 488–501.
Reis, A.H., Gama, C., 2010. Use of sand beds of variable permeability in beach profile engineering. AIP Conference Proceedings. 1254, pp. 231–235.
Richardson, M.D., Briggs, K.B., Bibee, L.D., Jumars, P.A., Sawyer, W.B., Albert, D.B., Bennett, R.H., Berger, T.K., Buckingham, M.J., Chotiros, N.P., Dahl, P.H., Dewitt, N.T., Fleischer, P., Flood, R., Greenlaw, C.F., Holliday, D.V., Hulbert, M.H., Hutnak, M.P., Jackson, P.D., Jaffe, J.S., Johnson, H.P., Lavoie, D.L., Lyons, A.P., Martens, C.S., McGehee, D.E., Moore, K.D., Orsi, T.H., Piper, J.N., Ray, R.I., Reed, A.H., Self, R.F.L., Schmidt, J.L., Schock, S.G., Simonet, F., Stoll, R.D., Tang, D., Thistle, D.E., Thorsos, E.I., Walter, D.J., Wheatcroft, R.A., 2001. Overview of SAX99: Environmental considerations. IEEE J. Ocean. Eng. 26, 26–53.
Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D., Lick, W., 1998. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles. J. Hydraul. Eng. 124, 1261–1267.
Román-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J., Gomez-Pina, G., 2011. Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment. J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng. 137, 332–343.
Román-Sierra, J., Muñoz-perez, J.J., Navarro-Pons, M., 2013. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands. Sedimentology 60, 1484–1497.
Soulsby, R.L., 1991. Dynamics of marine sands. Thomas Telford Publ, London (249 pp.).
Spanish Port System, 2012. Oceanography and meteorology data base. Spanish government. (www.puertos.es).
Tang, D., Briggs, K., Williams, K., Jackson, D., Thorsos, E., Percival, D., 2002. Fine-scale volume heterogeneity measurements in sand. IEEE J. Ocean. Eng. 27, 546–560.
Terzaghi, C., 1925. Principles of soil mechanics: V—Physical differences between sand and clay. Engineering News – Record 95. 912–916.
Tickell, F.G., Hiatt, W.N., 1938. Effect of angularity of grain on porosity and permeability of unconsolidated sands. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 22, 1272–1279.
Trask, P.D., 1931. Compaction of sediments. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull. 15, 271–276.
Trembanis, A.C., Pilkey, O.H., 1999. Comparison of beach nourishment along the U.S. Atlantic, Great Lakes, Gulf of Mexico New England shorelines. Coast. Manage. 27, 329–340.
USACE, 2002. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100. Part III, Chapter I: Coastal sediment properties.U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
Van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. J. Hydraul. Eng. 133, 649–667.
Wheatcroft, R.A., 2002. In situ measurements of near-surface porosity in shallow-water marine sands. IEEE J. Ocean. Eng. 27, 561–570.

SEDIMENTOLOGY the journal of the International Association of Sedimentologists

Sedimentology (2013) **60**, 1484–1497 doi: 10.1111/sed.12040

Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain-size analysis of beach and dune sands

JORGE ROMÁN-SIERRA, JUAN J. MUÑOZ-PEREZ and MARINA NAVARRO-PONS
Applied Physics Department, Sea Sciences Faculty, University of Cadiz, 11510 - Puerto Real (Cadiz), Spain (E-mail: jorge.roman@uca.es)

Associate Editor – Nick Lancaster

ABSTRACT

Grain size is a fundamental property of sediments and is commonly used to describe sedimentary facies and classify sedimentary environments. Among the various conventional techniques utilized to determine grain-size frequency distributions, sieving is the most widely applied procedure. The accuracy of such analyses is, among other factors, strongly dependent on the sieving time. However, despite a substantial amount of research in this field, optimal sieving times for different types of sediments have, to date, not been established. In this article, the influence of sieving time on grain-size analyses of medium-grained microtidal and mesotidal beach and dune sands has been determined. To assess the precision of important textural parameters, such as median grain size, sorting, skewness and kurtosis, an error analysis was carried out for different sieving times (2, 5, 10, 15 and 20 minutes). After calibrating the analytical and sampling methodologies, significant deviations were registered when sieving time was less than 10 minutes. However, such deviations were very small and grain-size distributions remained almost identical for sieving times of 10 minutes and longer, relative errors being as low as 0% in some cases.

Keywords Grain size, granulometric analysis, kurtosis, median grain diameter, sieving time, skewness, sorting.

INTRODUCTION

Grain size is one of the most fundamental properties of sediments and is of primary importance for the entrainment, transport and deposition of granular material. In this context, grain-size distributions provide important clues to sediment provenance, transport history and depositional conditions (e.g. Folk & Ward, 1957; Friedman, 1979; Bui *et al.*, 1990; Bernabeu *et al.*, 2002; Gutiérrez-Mas *et al.*, 2003; Benavente *et al.*, 2005; Gómez-Pina *et al.*, *2006*; Baquerizo & Losada, 2008) and grain-size analysis is an essential tool for classifying sedimentary facies and environments (Folk, 1954; Shepard, 1954; Blair & McPherson, 1999; Flemming, 2000; Anfuso & Gracia, 2005; Román-Sierra *et al.*, 2011). Currently, techniques commonly employed in grain-size determination include direct measurement, dry and wet sieving, sedimentation, or the use of different particle-size analysers, including laser granulometers, X-ray-based Sedigraphs and Coulter particle counters (Blott & Pye, 2001, 2006), or the autocorrelation technique for estimating grain size from digital images of sand beds (Rubin, 2004; Buscombe & Masselink, 2009). In the case of sand and gravel, the most common technique used for textural studies is sieving, a method with a very long tradition in sedimentology (Blatt *et al.*, 1980).

More reviews of conventional techniques used in modern geological particle-size analysis can be found in Syvitski (1991), Barbanti & Bothner (1993) and Beuselinck *et al.* (1998). Mathematical treatments of granulometry, originally proposed by Matheron (1975) to

© 2013 The Authors. Journal compilation © 2013 International Association of Sedimentologists

characterize sieving processes in random sets, are used for grain-size and textural classifications because they are based on comprehensive statistical analyses of grain-size frequency distributions (Chen & Dougherty, 1994). Sediments are frequently classified according to their sand/silt/clay ratios (e.g. Folk, 1954, 1974; Shepard, 1954; Flemming, 2000) or gravel/sand/mud ratios (e.g. Folk, 1954, 1974; Blair & McPherson, 1999). Moreover, the internationally most commonly used grade scale (Tanner, 1969; Friedman & Sanders, 1978) is based on the logarithmic transformation of the millimetre-scale (Wentworth, 1922) which was subsequently expressed mathematically by Krumbein (1934a) in terms of the binary logarithms of the millimetre-scale, thereby giving birth to the so-called 'phi-scale'. It facilitated a more rigorous statistical analysis of grain-size frequency distributions (Krumbein, 1939). The mathematical expression of the phi-scale (ϕ) is given by:

$$D(\varphi) = -\log_2 d\ (\text{mm}) \quad (1)$$

and, conversely:

$$d\ (\text{mm}) = 2^{-D(\varphi)} \quad (2)$$

where D is the grain diameter in phi units, and d is the grain diameter in millimetres.

In the case of large sample sets, the computation of statistical parameters from grain-size frequency distributions can be a laborious procedure and depends on the methodology used. According to Blott & Pye (2001), the parameters used to describe a grain-size distribution fall into four principal groups: average size, sorting, skewness and kurtosis. These parameters can be determined arithmetically or geometrically (in metric units) and logarithmically (in phi units) by extraction of relevant percentile values from graphic plots (Folk & Ward, 1957), or by the mathematical method of moments using the largest possible number of evenly spread percentile values that can feasibly be extracted from a distribution (Krumbein & Pettijohn, 1938; Folk, 1974; Friedman & Johnson, 1982; USACE, 2008). These methods are also frequently used as effective descriptors of texture and grain shape (Batman & Dougherty, 1997; Sand & Dougherty, 1998). The analysis using textural characteristics, such as mean or median grain size, sorting, skewness and kurtosis, to distinguish between different sedimentary environments must be examined more critically because the parameters strongly depend on the method used to obtain these values (Syvitski, 1991). In this sense, only frequency curves generated by the same method, and subsequently processed by identical computational procedures, can be meaningfully compared (Flemming, 2007). Furthermore, results obtained using different methods may not be directly comparable, and it can be difficult to assimilate size data obtained using more than one method (Pye, 1994). It is also extremely difficult to specify the accuracy of the measures when the particles are of irregular shape, as in the case of bioclastic sediments. Precision, i.e. the reproducibility of results, may be determined through the systematic analysis of several splits of a sample, several analyses of the same sample or the analysis of several samples collected at the same locality. According to Syvitski (1991), it is important that precision be reported because sieving time can influence the results.

Several studies have been carried out to evaluate sifting efficiency in relation to sieving time. The principal hypothesis was that longer sieving times were needed when fine material was present because the finer the material, the greater the number of sieves that had to be passed, and because the time taken for grains to pass through a sieve increased for smaller apertures (Mizutani, 1963). On the basis of such considerations, a median sieving time of 20 min was proposed by Syvitski (1991) and Lund-Hansen & Oehmig (1992), or 15 min by US Army Corps of Engineers (USACE), 2008. In summary, the minimum sieving times recommended in the literature show considerable variation and, therefore, can be regarded as very general guidelines only. In particular, systematic investigations on optimal sediment-specific and environment-specific sieving efficiency are currently still lacking.

This study was undertaken with the purpose of optimizing sieving time in the analysis of coastal dune and beach sediments, the main aim being to establish the minimum time required to obtain accurate results for medium-grained beach and dune sands. In addition, relative errors for different sieving times were investigated. This study thus attempts to provide an optimal sieving time, assuming a negligible error linked to both sampling and sieving methodologies.

STUDY AREA

Ten samples were collected from both beach and dune environments of the littoral zone near the cities of Cadiz and Tarifa, south-western Spain (Fig. 1). The beach samples were col-

© 2013 The Authors. Journal compilation © 2013 International Association of Sedimentologists,

lected at Victoria beach (Cadiz) and Valdevaqueros beach (Tarifa), the dune samples on the highly mobile transverse dune system at Valdevaqueros, which has one of the highest aeolian sand transport capacities in Europe (Muñoz-Perez *et al.*, 2009; Navarro *et al.*, 2011).

The beach samples were collected from the uppermost 20 cm of the dry, the intertidal and the submerged beach. The maximum tidal range at Victoria beach is 3·8 m (Muñoz-Perez & Medina, 2000) and that at Valdevaqueros is 1·5 m; the beaches are thus, respectively, mesotidal and microtidal according to the classification of Davies (1964). The yearly mean wave height in both areas is estimated to be between 0·5 m and 1·0 m, respectively (Spanish Port System, 2011). The dune sediments at Valdevaqueros were collected from the leeward face, dune crest, windward face and the dune foot (Fig. 2).

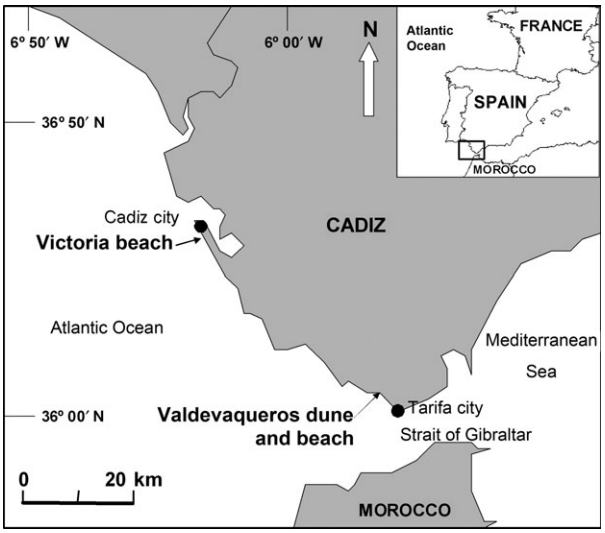


Fig. 1. Location of the Valdevaqueros dune and beach, and Victoria beach study areas.

METHODOLOGY

Sieving analysis and statistical computations

Several techniques are available to analyse the size of beach materials, each covering a restricted range in grain size. In the size range from medium gravels, through sand to coarse silt, grain-size analysis is usually carried out using certified sieves. In the present case, sampling and sieving procedures follow the recommendations proposed in Syvitski (1991) and in the laboratory procedures of USACE (2008). Table 1 lists the nine sieve intervals between 2 mm and 0·063 mm chosen for this experiment.

Each sand sample weighed around 100 g. The samples were analysed using sieving times of 2, 5, 10, 15 and 20 min in a Ro-Tap sieve shaker machine (W.S. Tyler Industrial Group, Mentor,

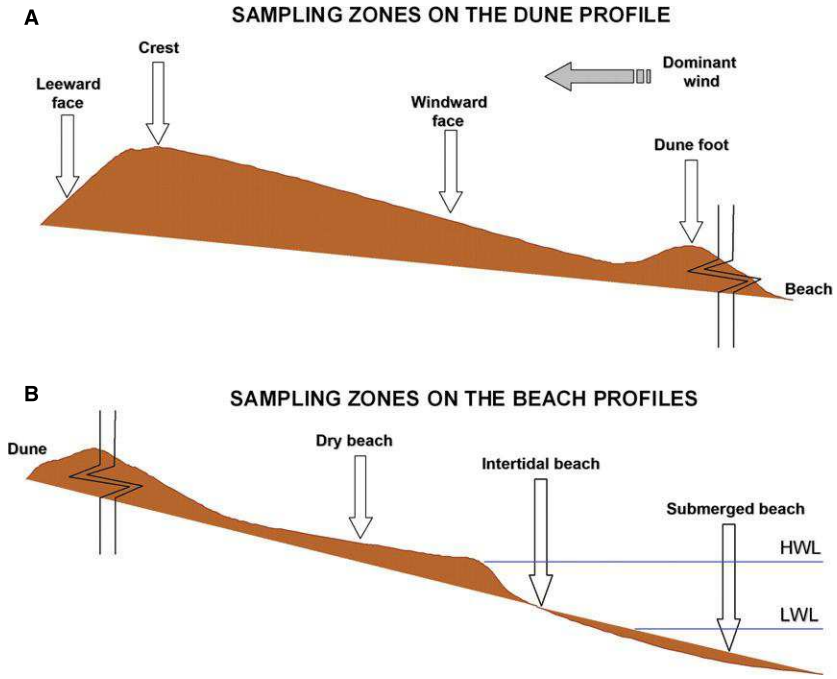


Fig. 2. Sampling locations along Valdevaqueros dune (A) and Victoria and Valdevaqueros beach (B) profiles: 'HWL' – Highest Water Level; 'LWL' – Lowest Water Level.

Table 1. Sand sieves chosen (nine) – Several classifications of sediment particle sizes.

Wentworth classification	Size in mm	Phi size	US standard sieve
Gravel	>2·000	<−1·000	<10
Very coarse sand	2·000 to 1·000	0·000	10 to 40
Coarse sand	1·000 to 0·710	0·500	
	0·710 to 0·500	1·000	
Medium sand	0·500 to 0·355	1·500	40 to 200
	0·355 to 0·250	2·000	
Fine sand	0·250 to 0·125	3·000	
Very fine sand	0·125 to 0·063	4·000	
Silt and clay	<0·063	>4·000	>230

OH, USA) operated at 2·6 rpm and 300 taps/min. The individual sieve fractions were subsequently weighed with a ±0·01 g precision balance. After each analysis, the sieve weight, the retained percentage, the percentage passing, the analysis liability, the granulometric curve and the histogram with the line tendency for each sieve were computed.

Natural sediment samples are commonly composed of variously shaped particles covering a variable range of grain sizes. It is thus necessary to characterize each sample by means of a typical grain diameter as a measure of the central tendency of the distribution. Besides the mean diameter, the median grain diameter (D_{50}) is frequently chosen for this purpose (USACE, 2008). The D_{50} value represents the 50th percentile of a grain-size frequency distribution and is therefore the point at which, by weight, half of the particles in the sample have a larger diameter and half have a smaller diameter. In addition, other percentiles required for statistical analyses have also been determined. For example, D_{84} is the 84th percentile and hence the diameter at which 84% of the sediment, by weight, has a smaller diameter. An equivalent definition holds for the median of the phi-size distribution ϕ_{50} or for any other percentiles of the phi-scale (ϕ_{05}, ϕ_{16}, ϕ_{25}, ϕ_{50}, ϕ_{75}, ϕ_{84} and ϕ_{95}). Additional parameters, i.e. sorting, skewness and kurtosis, are used to indicate how a size distribution deviates from a log-normal distribution. The corresponding equations can be found in Folk & Ward (1957), Folk (1974) and Blott & Pye (2001). These textural parameters are the ones most commonly used to characterize a sediment sample and are widely applied in describing the sediment of depositional environments, including beaches and dunes. Verbal expressions for different categories of standard deviation (sorting), skewness and kurtosis are listed in Table 2.

Computation of relative errors in relation to sieving time

Relative errors were calculated for each of the studied parameters, considering all samples and sieving times. The relative error was defined as the absolute error divided by the theoretically most exact value that corresponds to a 20 min sieving time. By using this procedure, the error for each time interval was calculated. To obtain relative errors pertaining to the median diameter (D_{50}), a representative master sample was generated in each case (Medina *et al.*, 1994; Galofré *et al.*, 1996). For this purpose, several related samples from a depositional environment were blended into a single master sample for which the grain-size distribution and the textural parameters were then determined. In this study, representative master distributions were generated for the dune and the two beach environments.

Methodological accuracy

In the present context, the accuracy of an analysis is dependent on the average grain size of a sample, whereas the precision of an analysis, i.e. the reproducibility of the results, may be determined by comparing the results derived either from the separate analysis of several splits of a sample, or by reanalysing the same sample several times (Syvitski, 1991). In the experiments described here, errors associated with the sieving process were assessed by sieving the same sand sample three times. By using this procedure, the variability associated with sieving was determined. In addition, the error associated with sampling was assessed by comparing the results obtained from three samples collected at the same site.

RESULTS

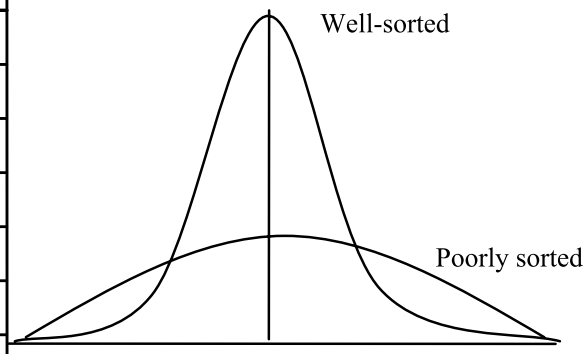
Precision of the method

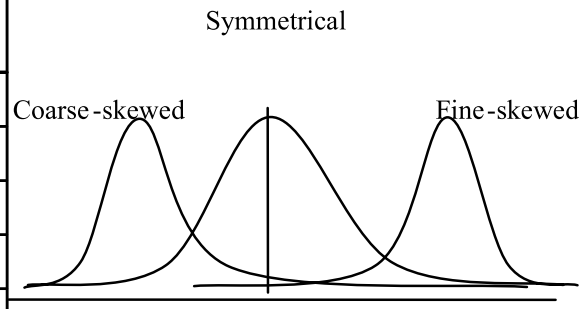
Although the initial weight of the sieved samples was higher than the minimum recom-

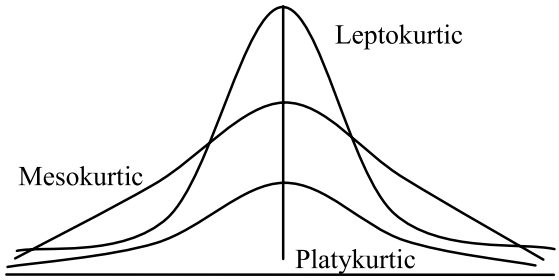
© 2013 The Authors. Journal compilation © 2013 International Association of Sedimentologists,

Table 2. Qualitative sediment distribution ranges for standard deviation, skewness and kurtosis (adapted from USACE, 2008).

Phi range	Parameter
	Standard deviation (sorting)
<0.35	Very well-sorted
0.35–0.50	Well-sorted
0.50–0.71	Moderately well-sorted
0.71–1.00	Moderately sorted
1.00–2.00	Poorly sorted
2.00–4.00	Very poorly sorted
>4.00	Extremely poorly sorted
	Coefficient of skewness
<-0.3	Very coarse-skewed
–0.3 to –0.1	Coarse-skewed
–0.1 to + 0.1	Near-symmetrical
+0.1 to 0.3	Fine-skewed
>+0.3	Very fine-skewed
	Coefficient of kurtosis
<0.65	Very platykurtic (flat)
0.65–0.90	Platykurtic
0.90–1.11	Mesokurtic (normal peakedness)
1.11–1.50	Leptokurtic (peaked)
1.50–3.00	Very Leptokurtic
>3.00	Extremely leptokurtic







mended in the literature (for example, 40 g/sample in USACE, 2008), it was limited to 100 g/sample to minimize the errors of precision. In the present case, the precision of the method can be estimated as a function of sampling and sieving analysis.

Computational precision related to sand sampling

To estimate the error introduced when collecting the sample in the field, several samples were taken at the same locality. For this purpose, an

intertidal locality along the Victoria beach profile was selected because it consisted of moderately well-sorted sand (σ_ϕ = 0·60), and because sampling was both easier and less costly than in the submerged zone. The samples were analysed following the methodology outlined above.

The results, which are listed in Table 3, show a similar retained percentage for each of the sieves. The standard deviation calculated for each sample indicates irrelevant differences and low maximum relative errors. For the sieve fractions close to the D_{50} value, maximum relative errors are almost zero. Consistent with corresponding published data, the probable sampling error is reduced by about 30% when two samples, by 50% when four samples, by 60% when six samples were combined, respectively. The gain in error reduction thus decreases as the sample number increases, 10 samples merely achieving a 70% error reduction (Krumbein, 1934b; Krumbein & Pettijohn, 1938).

Precision of the sieving analysis

To determine the accuracy and precision of the applied methodology, the same sand sample was analysed three times for a sieving period of 5 min. The material loss commonly associated with sieving has been discussed in Dalsgaard & Jensen (1985), where an average loss per analysis of 0·02% was established for a 30 g sample. This forfeiture can be considered negligible because it does not represent a significant proportion of the total sample. In the case of the intertidal sample from Victoria beach (Table 4), a maximum loss per sieving analysis of 0·01% for a 100 g sample was registered. Thus, losses during the analysis were negligible.

The methodological error is expressed as the standard deviation of the retained sample for each sieve. In the present case, the standard deviation is nearly zero for all sieves, showing a <5·4% maximum relative error. From this, it can be concluded that the methodological error associated with sampling and analysis can be considered negligible. This fact increases the confidence in the results of the various sieving times chosen in this study.

After the precision computations, the main parameters (median size, sorting, skewness and kurtosis) obtained for different sieving times (2, 5, 10, 15 and 20 min) were compared for all

Table 3. Analyses results obtained from three samples at the same location in Victoria beach.

Sieve size (mm)	1st analysis % retained	2nd analysis % retained	3rd analysis % retained	Average	Standard deviation	Maximum relative error (%)
2·000	1·14	1·10	1·23	1·16	0·07	6·34
1·000	1·01	0·96	0·93	0·97	0·04	3·79
0·710	0·98	0·99	0·79	0·92	0·11	14·13
0·500	2·92	2·90	2·59	2·80	0·19	7·61
0·350	12·14	12·09	12·20	12·14	0·06	0·47
0·250	37·27	37·22	37·36	37·28	0·07	0·21
0·125	41·36	41·50	41·59	41·48	0·12	0·30
0·063	2·83	2·91	2·91	2·88	0·05	1·85
0·000	0·33	0·31	0·38	0·34	0·04	11·76

Table 4. Results obtained from three analyses on the same intertidal sample from Victoria beach.

Sieve size (mm)	1st analysis % retained	2nd analysis % retained	3rd analysis % retained	Average	Standard deviation	Maximum relative error (%)
2·000	0·10	0·10	0·11	0·10	0·00	4·08
1·000	0·46	0·46	0·45	0·46	0·00	0·90
0·710	1·14	1·09	1·09	1·11	0·03	2·62
0·500	4·46	4·47	4·44	4·45	0·02	0·33
0·350	13·34	13·35	13·35	13·34	0·00	0·02
0·250	39·33	39·60	39·86	39·60	0·27	0·67
0·125	39·56	39·36	39·22	39·38	0·17	0·45
0·063	1·57	1·51	1·42	1·50	0·08	5·37
0·000	0·06	0·06	0·06	0·06	0·00	0·00

samples from each environment to establish the optimal sieving time in relation to the highest precision. The relative errors corresponding to each parameter at different times were also established. By using this procedure, the influence of sieving time was determined for the 10 samples collected in the three different environments.

Influence of sieving time on Victoria beach samples

The granulometric analyses of the three sand samples collected along the transverse profile across Victoria beach show that the sediment consists of medium sand with D_{50}-values ranging from 0·28 to 0·32 mm after the 2 min sieving time (Fig. 3). In each case, there is a clearly decreasing tendency with increasing sieving time, the values stabilizing after 10 min. With respect to the master sample from Victoria beach, the relative error in the D_{50}-value always remains <10%, reaching a value <3% after 10 min sieving time. Sorting shows a slight decreasing tendency over the first 10 min of sieving time and then becomes stable. The sediment is moderately well-sorted (σ_ϕ = 0·59 to 0·71), the relative error initially being <8%, reaching 0% after 10 min.

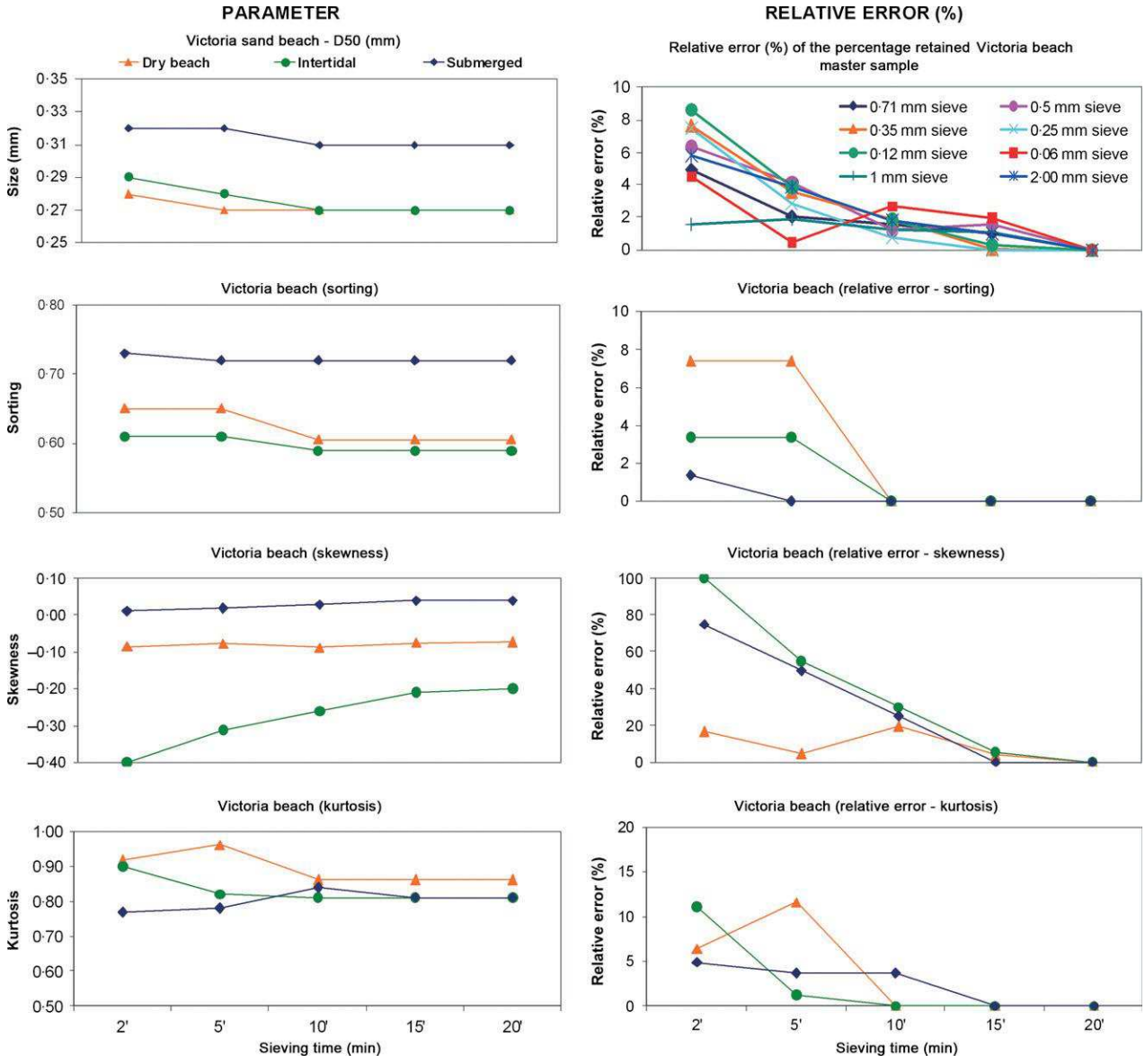


Fig. 3. Median grain size, sorting, skewness, kurtosis and relative errors as a function of sieving time for Victoria beach samples.

Skewness, in turn, changes negligibly for both the submerged and dry beaches, the distribution essentially remaining symmetrical. In the case of the intertidal sample, by contrast, the skewness decreases progressively from an initial negative value ($\alpha_\phi = -0{\cdot}40$) after 2 min sieving time to a less negative value ($\alpha_\phi = -0{\cdot}20$) after 20 min sieving time, the median diameter becoming slightly finer from 0·29 to 0·27 mm. The relative error is 100% for 2 min, 30% for 10 min and <10% from 15 min onward.

The kurtosis values of all three samples converge towards the 10 min sieving time and remain stable thereafter. All samples show a platykurtic distribution throughout (β_ϕ = 0·80 to 0·90), and the relative errors decrease from initially 5 to 12% to <4% after 10 min.

Influence of sieving time in the Valdevaqueros beach samples

The sediment of the microtidal Valdevaqueros beach also consists of medium sand, although overall somewhat coarser than at Victoria beach, ranging from 0·29 to 0·47 mm after the 2 min sieving time (Fig. 4). In all three samples, the median diameter decreases slightly with increasing sieving time, before stabilizing at values between 0·26 mm and 0·43 mm after 10 min. The relative error of the master sample decreases

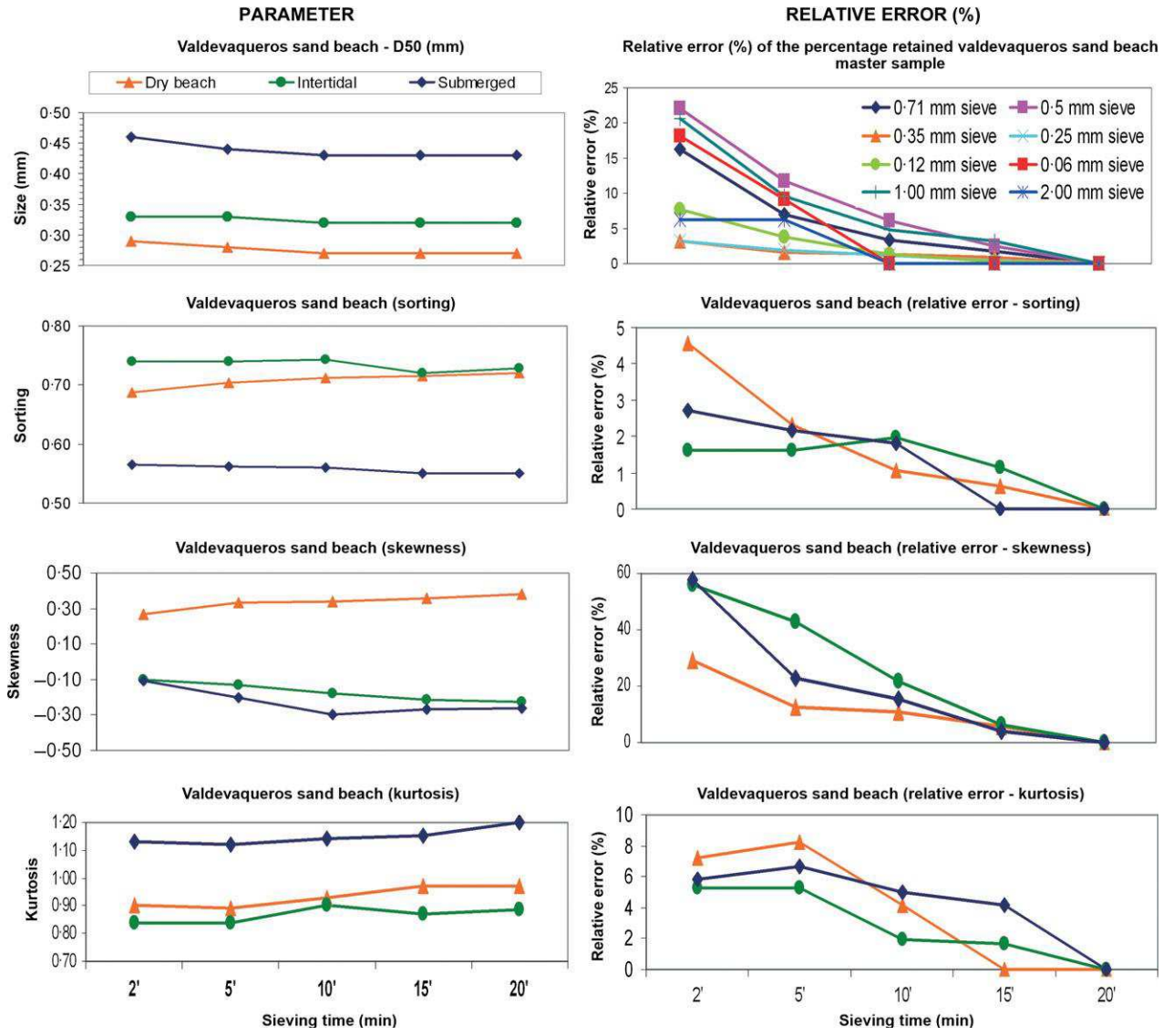


Fig. 4. Median grain size, sorting, skewness, kurtosis and relative errors as a function of sieving time for Valdevaqueros beach samples.

© 2013 The Authors. Journal compilation © 2013 International Association of Sedimentologists,

clearly with increasing sieving time, becoming <6% after 10 min.

The sorting of the samples remains stable throughout the sieving time, reflecting moderately well-sorted sands. The submerged sand (σ_ϕ = 0·55) is better sorted than the rest of the beach (σ_ϕ = 0·69 to 0·74). The relative error decreases with increasing sieving time, reaching errors <2% after 10 min for all samples.

The skewness increases in all three samples, the dry beach samples getting slightly more positively skewed (α_ϕ = 0·25 to 0·35), while the other two samples get more negatively skewed from −0·10 to −0·3. The relative error is the same as in the Victoria beach sand, reaching <8% after 15 min.

The kurtosis essentially remains stable, except for a slightly growing tendency after 5 min sieving time. Valdevaqueros beach samples are platykurtic with a tendency towards a mesokurtic shape (normal peakedness with β_ϕ = 0·80 to 0·95), with the exception of the submerged sample, which has a leptokurtic distribution (β_ϕ = 1·10 to 1·20). In all three cases, the relative error is <10% after 2 min and <5% after 10 min sieving time.

Influence of sieving time on the Valdevaqueros dune samples

The grain analyses of the four sand samples collected across the highly mobile transverse dune system of Valdevaqueros classify the dune sand as consisting of medium sand, the D_{50}-values ranging between 0·28 mm and 0·34 mm after the 2 min sieving time (Fig. 5). As at the other sites, the median diameter diminishes slightly with increasing sieving time, but stabilizes after 10 min, with the exception of the dune foot sample which requires 15 min to stabilize. The relative error of the master sample decreases asymptotically with increasing sieving time, reaching <5% after 15 min.

Sorting decreases slightly with sieving time, except at the dune crest where it increases marginally. Overall, the dune sand is moderately well-sorted. With a sorting value of σ_ϕ = 0·52, the windward sand is better sorted than the dune foot sand (σ_ϕ = 0·71); this explains the longer sieving time needed by the dune foot sand to reach a stable D_{50}-value. The relative error decreases with sieving time, reaching 0% for the windward, leeward and dune foot samples after 10 min. The dune crest sample, by contrast, lags behind, reaching a relative error of 3% after 10 min. All four dune samples are slightly negatively skewed and generally tend towards lesser skewness, i.e. towards more symmetrical distributions, with increasing sieving time (α_ϕ = −0·30 to −0·10). An exception is the dune foot sand, the skewness increasing from −0·21 to −0·31 after 5 min before stabilizing. The relative error in skewness diminishes with sieving time for all samples, reaching a highest value of 20% after 10 min and <9% after 15 min. It is worth mentioning here that the decreasing tendency is strongest for the dune foot sand, which has a relative error close to 50% after 2 min but reaches zero after 15 min.

Kurtosis remains stable for the first 5 min and then decreases slightly with sieving time. However, although the windward, leeward and dune foot samples are all platykurtic (β_ϕ = 0·75 to 0·85), the dune crest sample is leptokurtic at first and then becomes mesokurtic (normal peakedness β_ϕ = 1·00 to 1·10) after 10 min. The relative error for the kurtosis is <10% after 2 min and <5% after 10 min for all samples.

DISCUSSION

All of the samples analysed in this study consist of medium sand. In general, the median grain sizes diminish slightly during the first 10 min of sieving time and stabilize thereafter, with the exception of the Valdevaqueros dune foot sample, which becomes stable after 15 min due to its poorer sorting (σ_ϕ = 0·71) and platycurtic nature (β_ϕ = 0·75). All other parameters (i.e. sorting, skewness and kurtosis) show only small changes with sieving time. The relative error for each parameter decreases rapidly with sieving time and stabilizes after 10 to 15 min.

When comparing the sands of Victoria beach (D_{50} = 0·28 to 0·32) with the sands of Valdevaqueros beach (D_{50} = 0·29 to 0·47), the maximum relative errors after 10 min are 3% and 6%, respectively. For the Valdevaqueros dune (D_{50} = 0·28 to 0·34), the maximum error is 10% after 10 min and 5% after 15 min. This difference suggests that the dune sands are generally less well-sorted than the beach sands. In contrast to the other localities, the kurtosis of all dune samples shows a slightly decreasing tendency towards 15 min, tending towards very platykurtic and more poorly sorted grain-size distributions.

The main results of this study are summarized in Table 5, which shows the maximum relative

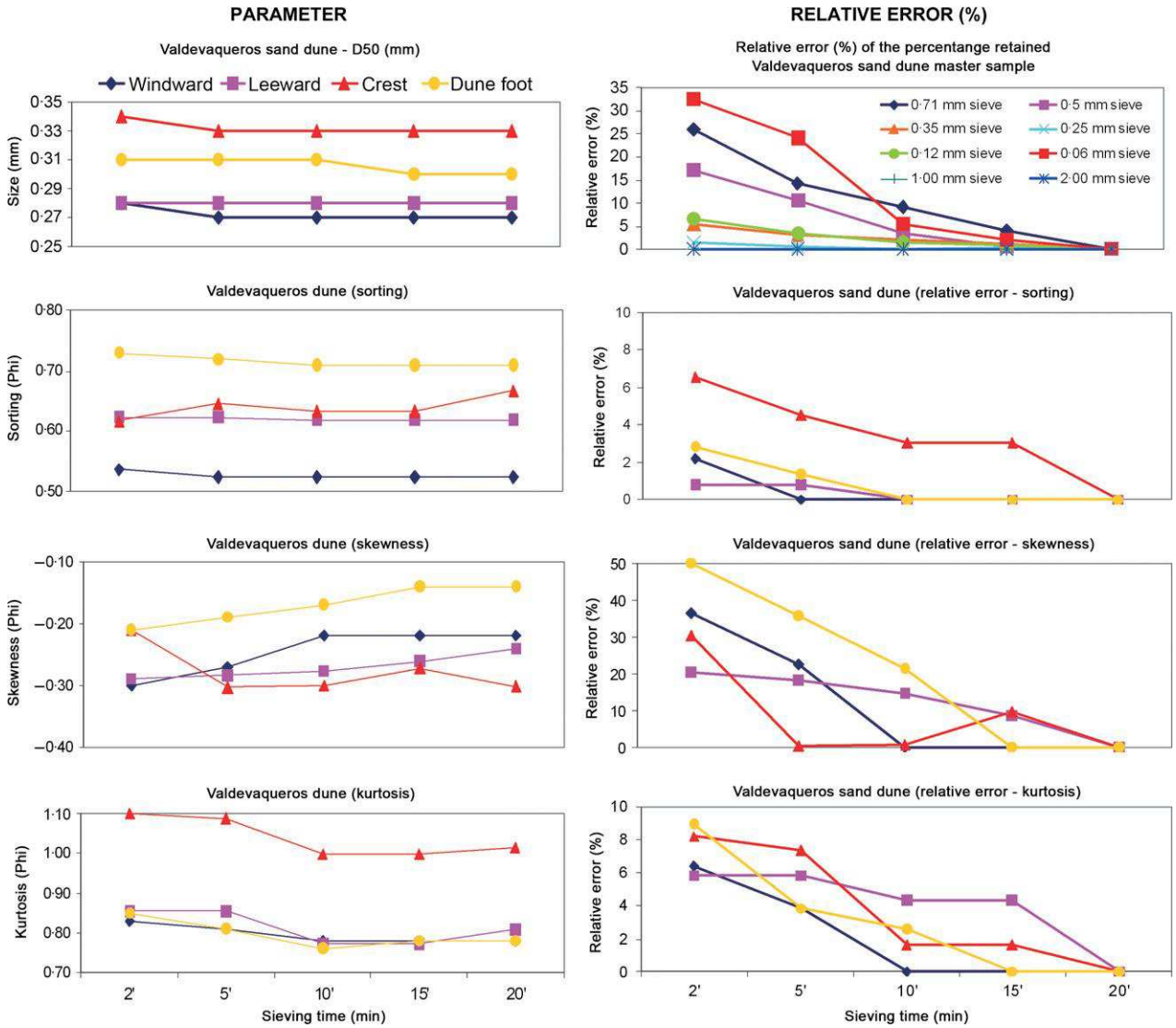


Fig. 5. Median grain size, sorting, skewness, kurtosis and relative errors as a function of sieving time for Valdevaqueros dune samples.

Table 5. Maximum relative error percentage for the studied statistical parameters related to each sand master sample for different sieving times.

		Victoria beach		Valdevaqueros beach		Valdevaqueros dune	
	Sieving time (min.)	10′	15′	10′	15′	10′	15′
Maximum relative error (%)	D_{50}	3%	2%	6%	3%	10%	4%
	Sorting	0%	0%	2%	2%	3%	3%
	Skewness	30%	10%	20%	10%	20%	9%
	Kurtosis	5%	0%	5%	4%	5%	4%

error of each parameter for sieving times of 10 and 15 min. The values demonstrate clearly that 10 min of sieving time is sufficient to obtain reliable and consistent data for the computation of textural parameters for samples from these environments. The maximum relative error is around 6%, except for the skewness parameter which needs 15 min of sieving time to reach a

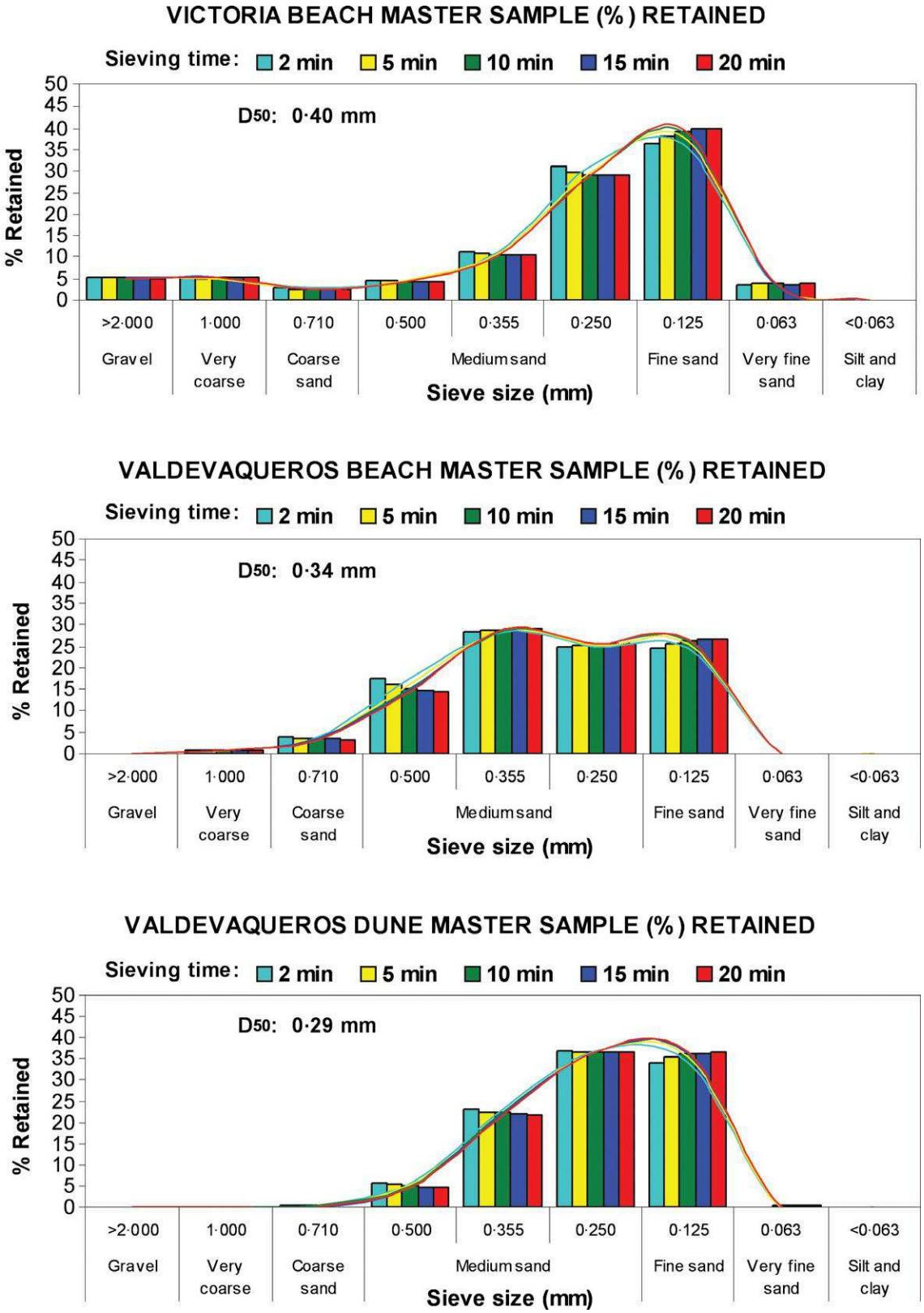


Fig. 6. Percentage retained versus sieve size fractions (mm) for different sieving times of Victoria beach, Valdevaqueros beach and Valdevaqueros dune master samples.

relative error around 10%. For the dune samples, 15 min are needed to obtain maximum relative errors under 4% for all parameters except skewness (9%), which tends towards more positive values when the sieving time is increased. This trend shows that all sand samples have a tendency towards more symmetrical distributions when sieving time increases. The differences in skewness may be due to variable contents of irregularly shaped particles in the individual samples. This fact suggests that factors such as particle shape (roundness and sphericity) and average particle size may influence the relative error in sieving and should, therefore, be the focus of future research.

The percentages of retained material in individual sieve size fractions for different sieving times are illustrated in Fig. 6. According to Syvitski (1991), increasing sieving time increases the probability for a particle to pass through a lower sieve, thereby diminishing the percentages of coarse and medium sands retained in upper sieves (0·500 to 0·250 mm). This statement is confirmed by the present study, which shows that the retained percentages of the Victoria beach master sample diminish over time for coarse and medium sand sieves (0·500 to 0·250 mm). For fine sand sieves (0·125 mm), however, this tendency reverses with more of this sand being retained with increasing sieving time, although the trend stabilizes after 10 min. This phenomenon can be explained by enhanced sieving efficiency with increasing sieving time. However, because small amounts of this size fraction remain in the upper sieves, no clear tendency can be detected in this respect.

In the case of the Valdevaqueros beach master sample, the retained percentages diminish with increasing sieving time for coarse sand (0·710 mm and 0·500 mm). Again, this tendency reverses, but this time in the >0·355 mm sieve fraction where the sand retained initially increases with sieving time before stabilizing after 10 min. This sand fraction has a bimodal size distribution and the computation of textural parameters can thus produce spurious results because it is composed of a mixture of two different grain-size populations, a phenomenon frequently observed in nature (Flemming, 2007).

In the case of the Valdevaqueros dune master sample, the percentage of sand retained over time decreases progressively for both the 0·5 mm and 0·355 mm sieves. In medium sand sieves (0·250 mm), sand retention becomes stable after 10 min. In contrast to the 0·355 mm sieve, the fine sand sieve (0·125 mm) shows a similar trend to that observed in the Victoria beach sample, accumulating increasingly more sand with sieving time. The amount of sand retained by the other sieves is so small that no clear tendencies can be distinguished. The low percentage (<5%) retained by the very coarse and very fine sand sieves for all the master samples is insufficient for a quantitative analysis.

Larger grains in the 0·710 to 0·250 mm sieves evidently produce a hammering effect, which allows more grains to pass through the 0·125 mm sieve. The same effect was observed in other experiments dealing with a marine sand sample (Syvitski, 1991) and where pieces of rubber and brass were added to the individual sieves (Batel, 1971). It can thus be concluded that sieving time is an important factor in allowing sand grains to pass through to their appropriate sieve fractions. The results of this study demonstrate that the optimal sieving times proposed for the dune and the two beach environments are associated with low relative errors for every statistical parameter derived from the grain-size analysis.

CONCLUSIONS

In this study, the influence of sieving time on the accuracy of grain-size analyses of samples from two medium-grained microtidal and mesotidal beaches and a dune has been investigated with the aim of optimizing sieving time to achieve maximum sieving efficiency in the minimum amount of time. The main conclusions can be summarized as follows:

1 The comparison of grain-size analyses on three replicate samples from each environment shows almost negligible maximum relative errors and standard deviations, thereby demonstrating that the error caused by the methodology was insignificant.

2 Sieving efficiency generally improved with sieving time. To reduce sieving time to an acceptable limit, relative errors for each parameter were calculated. On this basis, an optimal sieving time of 10 min for the beach samples and 15 min for the dune samples was determined. Longer sieving times did not substantially improve the results.

3 This study has revealed that previously suggested sieving times of between 15 and 20 min for all types of sand (Syvitski, 1991; USACE, 2008) can be regarded as crude guidelines only.

4 The optimal sieving times derived at in the course of this study have both technical and economical relevance because time efficiency is achieved without sacrificing precision in the computation of textural parameters commonly used to describe grain-size distributions. It is therefore recommended that similar studies be carried out for environments other than those included in this study.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge all the members of the Coastal Engineering research group (RNM-912) for their contribution in the performance of this research.

REFERENCES

Anfuso, G. and **Gracia, F.J.** (2005) Morphodynamic characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: implications for coastal erosion management. *J. Coast. Res.*, **21**(6), 1139–1153.

Baquerizo, A. and **Losada, M.A.** (2008) Human interaction with large scale morphological evolution. An assessment of the uncertainty. *Coast. Eng.*, **55**(7–8), 569–580.

Barbanti, A. and **Bothner, M.H.** (1993) A procedure for partitioning bulk sediments into distinct grain-size fractions for geochemical analysis. *Environ. Geol.*, **21**, 3–13.

Batel, W. (1971) *Introduction to the Technology of Grain Size Measurement*. Springer-Verlag, Berlin, 214 pp.

Batman, S. and **Dougherty, E.R.** (1997) Size distributions for multivariate morphological granulometries: texture classification and statistical properties. *Opt. Eng.*, **36**, 1518–1529.

Benavente, J., **Gracia, F.J.**, **Anfuso, G.** and **López-Aguayo, F.** (2005) Temporal assessment of sediment transport from Beach nourishments by using foraminifera as natural tracers. *Coast. Eng.*, **52**(3), 205–219.

Bernabeu, A.M., **Medina, R.** and **Vidal, C.** (2002) An equilibrium profile model for tidal environments. *Sci. Mar.*, **66**(4), 325–335.

Beuselinck, L., **Govers, G.**, **Poesen, J.**, **Degraer, G.** and **Froyen, L.** (1998) Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, **32**, 193–208.

Blair, T.C. and **McPherson, J.G.** (1999) Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *J. Sed. Res.*, **69**, 6–19.

Blatt, H., **Middelton, G.V.** and **Murray, R.C.** (1980) *Origin of Sedimentary Rocks*, 2nd edn. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 766 pp.

Blott, S.J. and **Pye, K.** (2001) Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Proc. Land.*, **26**, 1237–1248.

Blott, S.J. and **Pye, K.** (2006) Particle size distribution analysis of sand-sized particles by laser diffraction: an experimental investigation of instrument sensitivity and the effects of particle shape. *Sedimentology*, **53**(3), 671–685.

Bui, E.N., **Mazullo, J.** and **Wilding, L.P.** (1990) Using quartz grain size and shape analysis to distinguish between aeolian and fluvial deposits in the Dallol Bosso of Niger (West Africa). *Earth Surf. Proc. Land.*, **14**, 157–166.

Buscombe, D. and **Masselink, G.** (2009) Grain-size information from the statistical properties of digital images of sediment. *Sedimentology*, **56**(2), 421–438.

Chen, Y. and **Dougherty, E.R.** (1994) Gray-scale morphological texture classification. *Opt. Eng.*, **33**, 2713–2722.

Dalsgaard, K. and **Jensen, J.L.** (1985) A methodological study of the sieving of small sand samples. In: *Proceedings of the International Workshop on the Physics of Blown Sand*, pp. 609–632. Mem. 8, Department of Theoretical Statistics, Institute of Mathematics, Aarhus University, Denmark.

Davies, J.L. (1964) A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Mortensen Sonderheft**8**, 127–142.

Flemming, B.W. (2000) A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Cont. Shelf Res.*, **20**(10-11), 1125–1137.

Flemming, B.W. (2007) The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis. *Sed. Geol.*, **202**(3), 425–435.

Folk, R.L. (1954) The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *J. Geol.*, **62**(4), 344–359.

Folk, R.L. (1974) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, TX.

Folk, R.L. and **Ward, W.C.** (1957) Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.*, **27**, 3–26.

Friedman, G.M. (1979) Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins. *Sedimentology*, **26**, 3–32.

Friedman, G.M. and **Johnson, K.G.** (1982) *Exercises in Sedimentology*. Wiley, New York.

Friedman, G.M. and **Sanders, J.E.** (1978) *Principles of Sedimentology*. Freeman, New York, 792 pp.

Galofré, J., **Montoya, F.J.** and **Medina, R.** (1996) Beach nourishment in Altafulla, Spain: verification of theoretical models. *ICCE*, **368**, 4730–4743.

Gómez-Pina, G., **Fages, L.**, **Ramírez, J.L.**, **Muñoz-Pérez, J.J.** and **Enríquez, J.** (2006) A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years. *ICCE*, **30**(4), 4167–4178.

Gutiérrez-Mas, J.M., **Moral, J.P.**, **Sánchez, A.**, **Dominguez, S.** and **Muñoz-Perez, J.J.** (2003) Multicycle sediments on the continental shelf of Cadiz (SW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **57**(4), 667–677.

Krumbein, W.C. (1934a) Size frequency distributions of sediments. *J. Sed. Res.*, **4**(2), 65–77.

Krumbein, W.C. (1934b) The probable error of sampling sediments for mechanical analysis. *Am. J. Sci.*, **227**, 204–214.

Krumbein, W.C. (1939) Graphic presentation and statistical analysis of sedimentary data. In: *Recent Marine Sediments* (Ed. P.D. Trask), pp. 558–591. Dover, New York, 1968.

Krumbein, W.C. and **Pettijohn, F.J.** (1938) *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York.

Lund-Hansen, L.C. and **Oehmig, R.** (1992) Comparing sieve and sedimentation balance analysis of beach, lake and eolian sediments using log-hyperbolic parameters. *Mar. Geol.*, **107**(1–2), 139–142.

Matheron, G. (1975) *Random Sets and Integral Geometry*. Wiley, New York, 261 pp.

Medina, R., **Losada, M.A.**, **Losada, I.J.** and **Vidal, C.** (1994) Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. *Mar. Geol.*, **118**(3-4), 195–206.

Mizutani, S. (1963) A theoretical and experimental consideration on the accuracy of sieving análisis. *J. Earth Sci.*, **11**(1), 1–27.

Muñoz-Perez, J.J. and **Medina, R.** (2000) Profile changes due to a Fortnightly Tidal Cycle. 27th International Conference on Coastal Engineering (ASCE), Sydney. pp. 3062–3075.

Muñoz-Perez, J.J., **Navarro, M.**, **Román-Sierra, J.**, **Tejedor, B.**, **Rodriguez, I.** and **Gomez-Pina, G.** (2009) Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphology*, **112**, 167–177.

Navarro, M., **Muñoz-Perez, J.J.**, **Román-Sierra, J.**, **Tsoar, H.**, **Rodriguez, I.** and **Gomez-Pina, G.** (2011) Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphology*, **129**(1-2), 14–28.

Pye, K. (1994) Properties of sediment particles. In: *Sediment Transport and Depositional Processes*, (Ed. K. Pye), pp. 1–24. Blackwell, Oxford.

Román-Sierra, J., **Navarro, M.**, **Muñoz-Perez, J.J.** and **Gomez-Pina, G.** (2011) Turbidity and other effects resulting from Trafalgar sandbank dredging and Palmar beach nourishment. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, **137**(6), 332–343.

Rubin, D.M. (2004) A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment. *J. Sed. Res.*, **74**, 160–165.

Sand, F. and **Dougherty, E.R.** (1998) Asymptotic granulometric mixing theorem: morphological estimation of sizing parameters and mixture proportions. *Pattern Recogn.*, **31**(1), 53–61.

Shepard, F. P. (1954) Nomenclature based on sand–silt–clay ratios. *J. Sed. Petrol.*, **24**, 151–154.

Spanish Port System (2011) http://w3.puertos.es/en/sistema_portuario/index.html

Syvitski, J.P.M. (1991) *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge University Press, New York, 368 pp.

Tanner, W.F. (1969) The particle size scale. *J. Sed. Petrol.*, **39**, 802–812.

USACE (2008) Coastal sediment properties. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual – Part III. EM 1110-2-1100.

Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.*, **30**, 377–392.

Manuscript received 9 October 2011; revision accepted 6 February 2013

© 2013 The Authors. Journal compilation © 2013 International Association of Sedimentologists,

Case Study

Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment

Jorge Roman-Sierra[1]; Marina Navarro[2]; Juan Jose Muñoz-Perez[3]; and Gregorio Gomez-Pina[4]

Abstract: Beach-nourishment requirements on the southwestern Spanish coast have led to a significant increase in offshore dredging. Following a new research line, assessment of changes recorded in physicochemical and biological parameters due to dredging and dumping operations was performed at the Cape of Trafalgar and Palmar Beach during June and July 2008. Turbidity, salinity, pH, dissolved oxygen, temperature, and suspended-sediment data were collected at 10 stations. At the end of the study, a three-campaign monitoring program was implemented for 1 year to assess the possible effects on biological communities and sediment properties. The relevant results, such as the average extent of the sediment plume (< 400 m) and its persistence in the environment (< 10 min), are discussed in this paper. A precise correlation between turbidity and suspended sediments and the recovery time of ecological balance were also established. Furthermore, minimal and reversible effects caused by dredging and dumping operations in this type of marine environment were identified.
DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000098. © *2011 American Society of Civil Engineers.*

CE Database subject headings: Turbidity; Dredging; Beach nourishment; Parameters; Environmental issues.

Author keywords: Turbidity; Sandbank dredging; Beach nourishment; Physicochemical parameters; Environmental effects; Cape of Trafalgar; Gulf of Cadiz.

Introduction

The dredging of marine sandbanks has been the usual technique for the nourishment of nearby beaches along the Spanish coast. Beach nourishment has evolved as the favored erosion-mitigation strategy in many areas of the world. The increasing number of people living on the coast, the safety of those people, and the high values of coastal property are all factors that have made beach nourishment a cost-effective strategy for managing erosion in many locations. Dredging has become increasingly inexpensive, and sand quality is often improved as borrow pits are moved closer to the shore (Kennedy et al. 2010). To be cost-effective, the optimum location for a borrow pit must be close enough to shore to minimize transport costs yet far enough offshore to minimize negative effects because of the presence of the dredge pit (Work et al. 2004).

According to Muñoz-Perez et al. (2003), a need for the regeneration of beaches in general exists in Spain because of the erosion experienced by most of the coast, which is attributed to the rise in sea level, the retention of sand in dams, occupation of dry beaches by urbanized areas, the removal of sand as a material for building construction, and so on. Unfortunately, the lack of sandbanks off the southwestern Spanish coast has been an ongoing problem for beach nourishment, even with the existence of dunes with an excess sand supply (Muñoz-Perez et al. 2009), because of the unprofitable sand-transport costs. This handicap led to the need to find new, alternative sources of sand. These alternatives are sand redistribution on the beach, the use of sand quarries, and the dredging of marine harbors, river mouths, and other marine sandbanks increasingly distant from the coastline. Today, this is possible because current dredges have a greater capacity for dredging at high depths, up to 100 m (Muñoz-Perez et al. 2003). In this context, dredging and material disposal could be defined as an artificially induced process of erosion, transport, and deposition of sediments. This process has the potential to directly or indirectly produce negative and positive effects on the environment of the dredged and discharge areas and on surrounding areas. Often, legislative and environmental regulations are set to limit the effect of these disturbances, which therefore must be quantified (OSPAR 2003). According to Winterwerp (2002), the level of disturbance depends on the amount of sediments released and the overflow procedure, on the hydrodynamic conditions, and on the near-field conditions. Among other activities, the primary sources of anthropogenic open-water turbidity are generally channel-maintenance dredging, the disposal of dredged material, and beach replenishment.

Many studies have been conducted in North America by the U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (USACE and USEPA 1992) on maintenance dredging and disposal activities in enclosed waters such as estuaries and embayments, locations where the presence of a high fine-sediment fraction contributes to elevated turbidity. Turbidity is the most important physical change generated in water quality (Goodwin and Micaelis 1984). With dredging, there may be potential problems associated with sediment plumes such as alterations in water quality of the local environment, both in the dredging and dumping areas (Drucker et al. 2004; Hitchcock and Bell 2004). According to Barnard (1978), tides also affect plume dispersion, with plumes extending landward and seaward during

[1]Applied Physics Dept., Sea Sciences Faculty, Univ. of Cadiz, CASEM, Poligono Rio San Pedro, s/n, 11510 Puerto Real (Cadiz), Spain (corresponding author). E-mail: jorge.roman@uca.es

[2]Applied Physics Dept., Sea Sciences Faculty, Univ. of Cadiz, CASEM, Poligono Rio San Pedro, s/n, 11510 Puerto Real (Cadiz), Spain. E-mail: marina.navarro@uca.es

[3]Applied Physics Dept., Sea Sciences Faculty, Univ. of Cadiz, CASEM, Poligono Rio San Pedro, s/n, 11510 Puerto Real (Cadiz), Spain. E-mail: juanjose.munoz@uca.es

[4]Coastal Dept. Ministry of Environment. C/ Marianista Cubillo, 7, 11008 Cadiz, Spain. E-mail: ggomez@mma.es

Note. This manuscript was submitted on September 2, 2010; approved on April 20, 2011; published online on October 14, 2011. Discussion period open until April 1, 2012; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the ***Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering***, Vol. 137, No. 6, November 1, 2011. ©ASCE, ISSN 0733-950X/2011/6-332–343/$25.00.

the incoming flood tides and the outgoing ebb tides, respectively. In many cases, increases in suspended-sediment concentration (SSC) levels are less than those generated by commercial shipping operations or during severe storms. Storms, floods, and large tides can increase SSC over much larger areas and for longer periods than dredging operations. Therefore, it is very difficult to distinguish between dredging-induced turbidity and that generated by natural marine processes or normal navigation activity (Pennekamp et al. 1996). Hitchcock et al. (1999) cited numerous dredging-related plume studies from around the world in their report on benthic and surface plumes prepared for the U.S. Minerals Management Service. Both surface and benthic plumes are usually associated with marine disposal of dredged material (open-water pipeline discharges or hopper-dredge releases). Other authors have identified potential effects of turbidity on water quality and organisms in inland bays and estuaries worldwide (Long et al. 1996; Brenon and Le Hir 1999; Robinson et al. 2005). Aquatic systems are very diverse, dynamic, and changing in time and space. Physical and chemical changes may be produced during and after dredging and dumping of the dredged material (Herbich 1992). The reported effects include increased turbidity, the reduction of primary productivity, and changes in the structural characteristics of plant communities (Lewis et al. 2001). In this context, several studies have been conducted elsewhere to determine dredging effects on aquatic flora such as seagrasses (Onuf 1994; Long et al. 1996), seaweeds (Lyngby and Mortensen 1996), and phytoplankton (Iannuzzi et al. 1996). Nevertheless, a review of the pertinent literature indicates a scarcity of existing data concerning the biological responses of fish and shellfish to suspended-sediment dosages commonly associated with dredging projects (Wilber and Clarke 2001). According to Winterwerp (2002), the bulk behavior of a water-sediment mixture appears to be of greater importance than the settling velocity of individual sediment particles. Several in situ case studies of this behavior have been reported in the open literature (Teeter 1988; Wolanski et al. 1992). Most of the studies, however, are either confidential or have been published in reports poorly accessible to interested engineers.

Considerably less research has been conducted in unprotected marine waters, where most of the literature has focused on the effects of turbidity on specific marine species and biosystems or on the transport dynamics of coarse sand rather than on the temporal or spatial characteristics of the resuspension of fine sediment. Few complete studies have been undertaken to quantify turbidity conditions during beach-nourishment activities (CSMW 2004). The methodology presents a detailed procedure for multidisciplinary environmental studies about the effect of marine dredging and dumping activities. The application of these steps to one case and its interpretation constitute the novel aspects of the present work. Therefore, the main goal of this work is the identification of possible alterations in the physicochemical and biological parameters of unprotected marine waters off the southwestern coast of Spain by using this methodology. Studies were performed during a sandbank dredging project for beach nourishment over the months of June and July 2008.

Antecedents

The coastline of the Gulf of Cadiz has been in recession for at least the past century. Erosion is caused by a negative sediment budget because of the instability of eroded coastal cliff sediments (Anfuso and Gracia 2005). Analysis of field data and aerial photographs over the past half-century period show that the coastline has suffered a recession rate of approximately 1 m/year on some points of the Spanish Southwest Atlantic coast (Muñoz-Perez et al. 2001). Because of these erosion rates, the Spanish Coastal Authority of the Ministry of Environment has developed a coastal-protection program based on beach nourishment, sometimes accompanied by supporting breakwater construction (Muñoz-Perez et al. 2001) or the installation of artificial reefs for coastal defense (Muñoz-Perez 2008). Furthermore, sediment-loss values on this coast were calculated per meter and year by dividing the yearly erosion rate by the beach length; the average value was 37.5 $m^3/m/year$ (Muñoz-Perez et al. 2001). These high erosion rates justify dredging activities for beach-nourishment purposes. In fact, Muñoz-Perez et al. (2001) found that a substantial decrease in the replenishment sand volumes in successive restorations performed on certain beaches led to drastic reductions in the yearly erosion rates. In this context, the study area, the coast of the Cadiz province, presents a variety of coastal-engineering and coastal-management problems with difficult solutions (Gomez-Pina et al. 2006). Thereby, beach-erosion problems have been solved by adding sand to the beaches along the Gulf of Cadiz.

Study Area

The study area includes an offshore borrow site, the Meca sandbank, and a dumping coastline zone, Palmar Beach, both located near the Strait of Gibraltar in southwestern Spain. More precisely, both are located to the west of the Cape of Trafalgar (36°12′ N; 6°05′ W) on the continental shelf that extends off the coast of Cadiz (see Fig. 1). In 2008, the spring tidal range was from 0.1 to 2.6 m, in relationship to the hydrographic zero. The average wind velocity was 5.7 m/s, and the maximum velocity was 18.2 m/s. The maximum current velocity was 63.3 cm/s, and the average value was 13 cm/s. The average wave height was approximately 1.15 m with a maximum of 9 m (Fig. 2). All values are obtained from the same deep water buoy: Gulf of Cadiz (Buoy no. 2342) (Spanish Port System 2008).

The Meca sandbank is a triangular submerged shelf found between 15 and 20 m depth lying 5 km southwest of Palmar Beach. There are several other irregular formations on the seabed within the study area, such as the reef flat of Conil and the low, rocky

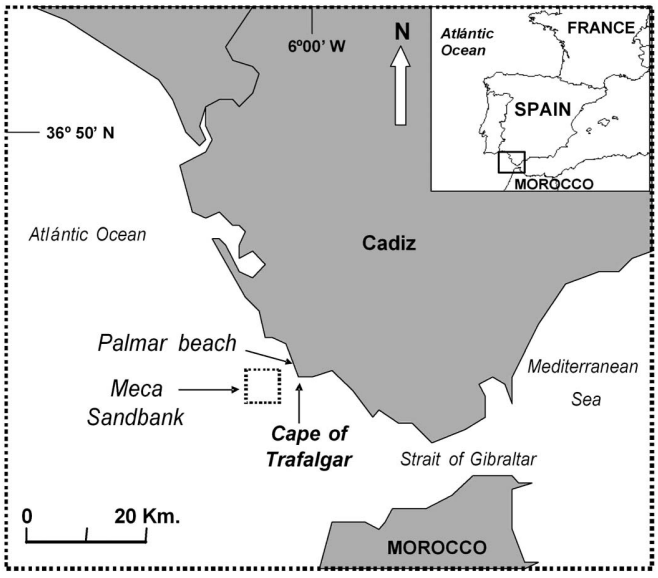


Fig. 1. Location of the study area, including dredging and dumping zones

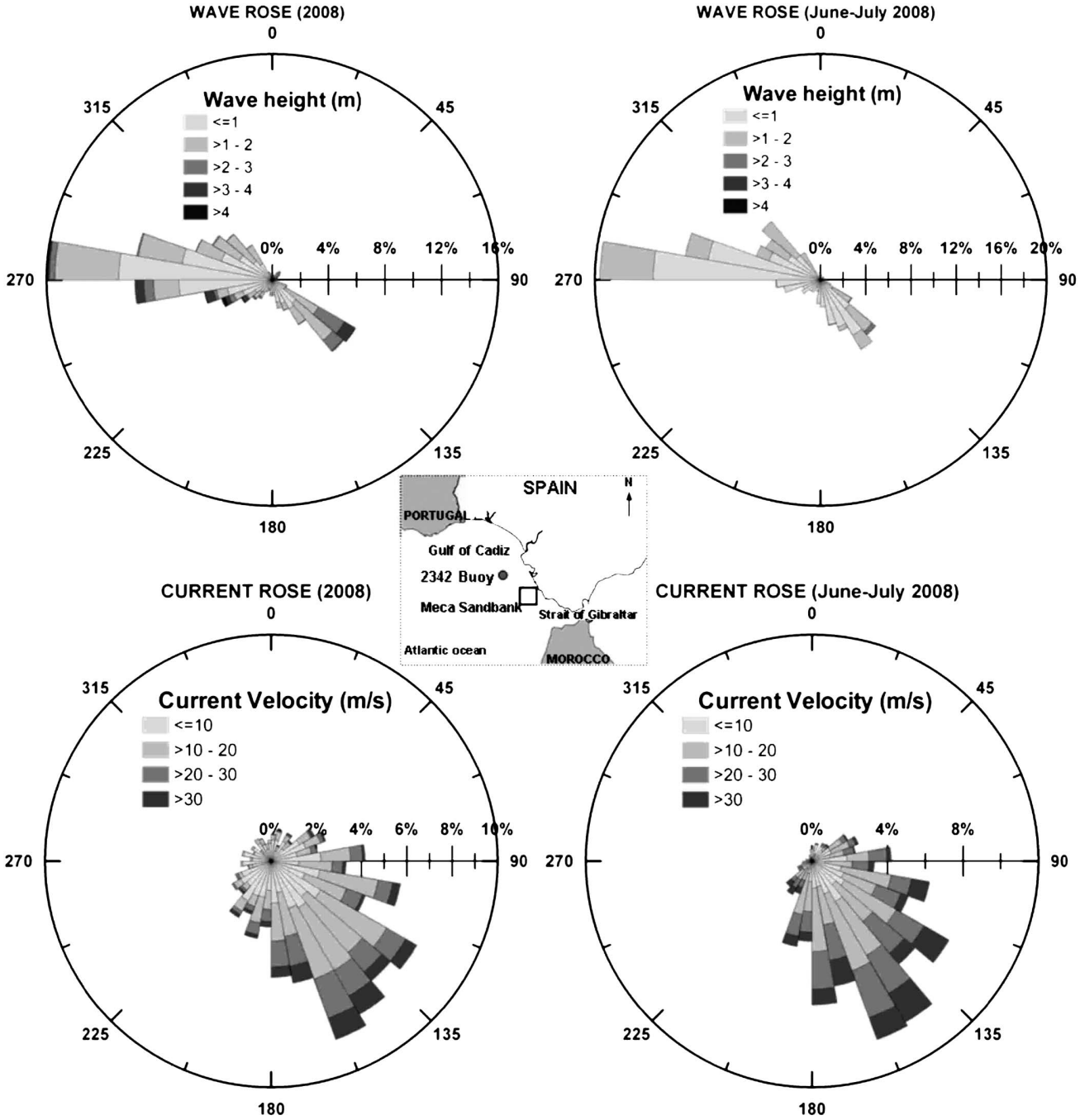


Fig. 2. Wave and current roses in the long-term (2008) and short-term (June to July 2008) [data from Gulf of Cadiz Buoy no. 2342 (Spanish Port System 2008)]

Cape of Trafalgar. Quaternary elements characteristic of the marshes and alluvial deposits appear in the area (Dabrio et al. 2000). The Meca sandbank has a surface area of approximately 2.5 km^2 and an estimated usable sand volume of 5,000,000 m^3 over the next 10 years. It is thus an important national marine reservoir of medium and coarse sands. This dredging area was selected because historically it has been highly utilized by the Coastal Authority for beach-nourishment purposes. The most important dredging operations on the Meca sandbank in the past decade were for Cadiz and Palmar Beach nourishments (260,000 m^3 in 2004 and 595,000 m^3 in 2008, respectively). Currently, the remaining capacity of the sandbank is estimated at approximately 83%. According to other environmental studies (Ministry of Environment 2003), there was no significant environmental or physical effect to the area because of sand extraction.

Methodology

Dredging and dumping work was undertaken by using a trailing suction hopper dredge (TSHD). The type and characteristics of the dredge used are detailed in Table 1.

The dredging and beach-nourishment work began in June 2008 and was finished in July 2008, a period of 8 weeks.

Table 1. Features of the Hydraulic Dredge Used

Dredger features	
Name	HAM-311
Company	Dravo S.A.
Type	Trailing suction hopper dredger (TSHD)
Year of construction	1994
Hopper capacity	3,510 m^3
Deadweight	5,059 tons
Speed loaded	11.5 kn
Speed dredging	3 kn
Propulsion	2 × 1,150 kW
Bow thruster	375 kW
Maximum dredging depth	29.6 m
Suction pipes	Φ 900 mm
Discharge pipe	Φ 800 mm
Total power installed	5,317 kW
Inboard dredge pump	1,545 kW trailing; 2,820 kW discharging

A preoperational campaign was performed to determine the resulting environmental effects on the Meca sandbank and Palmar Beach. This was useful in determining the water quality of the environment in the absence of dredging work. Afterward, seven campaigns were conducted weekly, developing studies of different physical and chemical parameters in the water column and sediment properties. All field campaigns during the works were developed under similar marine weather conditions because the TSHD cannot operate in waves more than 1.5 m. Finally, after the work was completed, three postoperation campaigns were performed (3, 6 and 12 months later) to assess the effects on the environment and sediments.

Ten sampling stations were used in the study area: four sampling stations were established at the dredging zone (1,000 × 500 m) and six other stations were located in two profiles in the discharge area at depths of 2, 5, and 10 m (Fig. 3). All stations were located by means of a differential global-positioning system (DGPS) with a 1-cm precision. The location of monitoring stations was taken into account when designing the fieldwork plan. It is evident that the number of sampling stations, the type and frequency of chemical analysis, and the media analyzed are important considerations even for small-scale dredging events (Lewis et al. 2001).

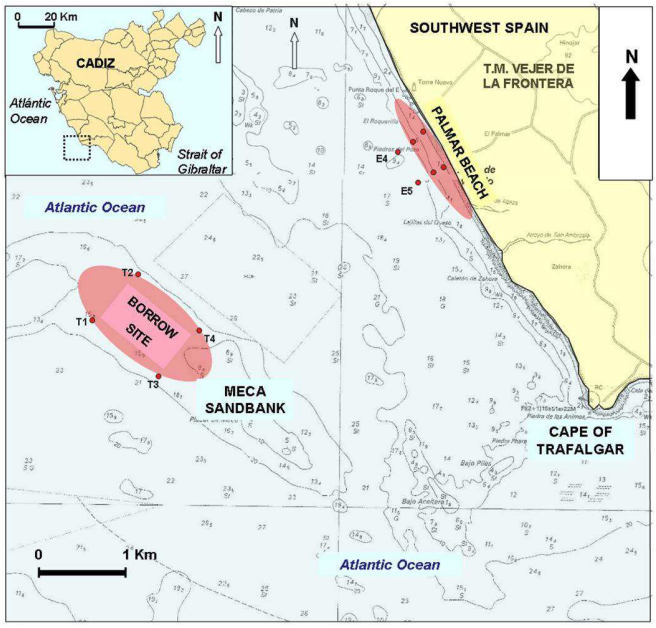


Fig. 3. Locations of dredging (T) and dumping (E) stations

Physicochemical Water Quality

Several physicochemical water-quality parameters were determined in situ before and during dredging and dumping activities at the aforementioned 10 sampling stations. The following parameters were recorded continuously: turbidity, salinity, pH, dissolved oxygen, temperature, and redox potential. Portable analytical instrumentation was used for these measurements (Hydrolab DS-5X multiparameter); the values were determined throughout the water column at all stations (UNE 1999). This instrumentation has a precision of ±0.1 nephelometric turbidity units (NTU) for the turbidity parameter. Water samples were taken in Ruttner and Niskin oceanographic bottles (volume 2 dm^3) and were stored at 4°C until use for later chemical analysis. Subsequently, the SSC (mg/L) was determined in the laboratory by a gravimetric technique (UNE 1999), with a detection limit of 2 mg/L and a precision of ±1 mg/L.

Furthermore, as a qualitative technique, the turbidity plume was analyzed by using aerial photographs taken from a remote-controlled zeppelin. This technique permitted demonstration of the expansion and durability of the turbidity plume on the sea surface when the dredging work was finished. Photographs were taken before and during dredging operations. Later, 10 photographs were taken each minute after the operations. Color photographs depicted plumes ranging in length from tens to hundreds of meters.

Marine-Sediment Identification

Grain size is one of the most important sediment particle properties. Sieve analysis is known to be an essential technique for classifying materials and sedimentary environments. It is, therefore, a widely used methodology in the field of coastal engineering. Grain size is related to the tendency of sediments to remain in suspension (Black and Parry 1999).

Sediment samples were collected at each of the 10 stations before and after operations (3, 6, and 12 months). Sediments were taken from the dredge with a stainless-steel Van Veen grab (surface area: 400 cm^2), capturing a ~10-cm thickness. Afterward, sediments were analyzed by granulometric and statistical studies in the laboratory. The material was sieved over the range of 2 to 0.075 mm (i.e., 2-, 1-, 0.5-, 0.355-, 0.250-, 0.125-, and 0.075-mm sieves). Size fractions are indicated in millimeters and phi units. The particle-size distributions and total organic carbon (TOC) contents of the sediments were determined by using techniques described in the ASTM published methods (1992). Graphical distributions were standardized for each sample, and inherent sediment values, such as the median diameter (D_{50}), were obtained. Additionally, other essential values were calculated for littoral protection against coastal erosion, i.e., the mean grain size (M_Φ), the SD, the symmetry degree (skewness), and the peakedness degree (kurtosis) according to USACE (2008). These results enabled the calculation of cross-shore and along-shore sediment transport at the beaches along with depth of closure, Dean's profile, Vellinga's profile, and several other parameters useful in coastal engineering.

Benthic-Community Characterization

Benthic-community characterization was performed both in the dredging area (at the same four monitoring zones: T1, T2, T3, and T4) and in the dumping area bottom (two monitoring zones: E4 and E5) on the biocenosis of calm-water infralittoral, photophilic communities. The aim was to assess ecological evolution

in the sedimentary and rocky-bottom zones in both study areas. This assessment was undertaken by the identification of several biological indexes, i.e., density, diversity, equitability, dominance, and complexity (Lloyd and Ghelardi 1964).

To perform a comparative study, the same monitoring stations were used in the first preoperational campaign and in the following postoperational campaigns (at 3, 6, and 12 months). A total of 14 biological samples were collected: eight in the dumping area (six in zone E4, a rocky platform, and two in E5, the intertidal sandy zone) and six in the dredging area (in zones T1–T4).

Within the dredging area, a sampling was performed at the sea bottom by using indirect tools, such as the Van Veen grab. Biological samples were sieved by using a 1-mm sieve. Afterward, they were immediately labeled and fixed in a 96% hexamethylenetetramine-neutralized alcohol solution. Several drops of Rose Bengal were added to the formol solution to aid in the identification of living organisms.

The sampling methodology performed in the dumping area consisted of the sampling of 1-m^2 surface segments to quantify changes in the organismal abundance and distribution. At each station, four subsamples of 0.25 m^2 each were taken to perform a taxonomic analysis in the laboratory. Ecological indexes such as the Shannon diversity, dominance, density, and percentage of coverage were calculated. This investigation will be extremely useful in determining the ecological environmental quality and allow for its monitoring.

Results and Discussion

Hydrological Characterization

Several physicochemical parameters were determined in all water columns at the 10 sampling stations, preoperationally and during dredging and dumping activities.

In case of the turbidity parameter, it was determined first in natural conditions (the preoperational campaign). Normal turbidity concentrations ranged from 0 to 8 NTU. The maximum value was recorded at middepth (8 and 11 m) in the dredging zone and minimum value (1 NTU) at the surface. During this phase, the climatological conditions were a wind velocity ~25 km/h, an averaged current velocity of only 13 cm/s, and waves from the west at heights ~1 m (Spanish Port System 2008). Generally, overspill from spillways, screening, and open-water disposal generates a far greater quantity of suspended material and larger plumes than bottom disturbances (CSMW 2004). However, it is difficult, if not impossible, to confidently separate anthropogenic modifications from natural evolution (Giardino et al. 2009).

During the dredging operations, there were seven additional weekly campaigns. All these results showed average values of 1.2 NTU and maximum values of 1.6 NTU at −7.8 m depth and 3.2 NTU at the surface. During the seven campaigns, the average values of the meteorological conditions were milder than during the preoperational campaign (wind velocity: 10–24 km/h; wave height: 0.6–0.9 m; and current velocity: 13–40 cm/s; see Table 2).

In addition to these measurements, a temporal and spatial study was performed on the surface of the dredging zone during the first campaign (Fig. 4). Note that the maximum isolated turbidity values of approximately 3 NTU were identified at 0:00, 1:50, and 5:30 min. Turbidity decreased with time and returned to natural conditions approximately 9 min afterward.

In Port Phillip Bay (a semienclosed tidal embayment) in southeastern Australia, turbidity concentrations in the sediment plume in the first 20 s after dredging were two to three orders of magnitude higher than in natural concentrations (Black and Parry 1994), and approximately 98% of the sediment in the plume was redeposited within 30 min at Portarlington (Black and Parry 1999).

In the spatial scale, near the dredging zone (< 50 m) the maximum turbidity value was 3 NTU, with other high values at 140 m (2.7 NTU) and 230 m (1.8 NTU). These alternative maximum and minimum values are most likely because of the existence and movement of different plume loops on the fixed measurement station and the existence of a strong current velocity in the surface, around 40 cm/s. Between 250 and 400 m, far from the dredging zone, turbidity values were normalized and similar to the preoperational campaign (0–1 NTU). The spatial evolution of turbidity was similar to a decreasing polynomial curve. A qualitative assessment of the plume dispersion is shown in the aerial photographic sequence (Fig. 5).

According to the data collected (Fig. 4) and the aerial images taken during and after dredging (Fig. 5), the turbidity plume on the surface had a maximum length of 400 m and an average persistence of approximately 9 min after dredging activities.

Numerous other observations and models made by the USACE (1992) support the conclusion that dredging plumes are localized and of short duration, with a benthic plume extending 700–730 m downcurrent from the dredge. Similar studies have demonstrated that most dredging-induced turbidity plumes are localized, spreading less than a 1,000 m from their source; the plumes are short lived, dissipating to restore ambient water quality within several hours after dredging is completed (CSMW 2004). These results are characteristic of both offshore operations and those in enclosed waters. Generally, beach-nourishment projects on high-energy beaches quickly equilibrate with the current wave regime. Finer sediments are promptly winnowed from the nourishment material,

Table 2. Climate Conditions in the Study Area during Preoperational and Operational Campaigns

Campaigns	Preoperational (June 5, 2008)	1st campaign (June 20, 2008)	2nd campaign (June 25, 2008)	3rd campaign (July 2, 2008)	4th campaign (July 9, 2008)	5th campaign (July 17, 2008)	6th campaign (July 21, 2008)	7th campaign (July 31, 2008)
Wind velocity (km/h)	25.7	13.7	11.4	24.4	9.21	10.6	12.5	21,0
Wind direction	NW	SE	SW	NW	W	SE	W	NW
Wave height (m)	1.1	0.6	0.7	0.9	0.6	0.6	0.6	0.9
Wave period (s)	3.7	3.7	3.9	3.4	3.7	3.6	3.4	3.5
Wave direction	NW	S	W	NW	SW	SE	W	NW
Current velocity (cm/s)	13.0	40.2	25.1	23.3	25.4	19.2	15.3	13.2
Current direction	SE	SE	SE	SE	S	SE	SE	SE

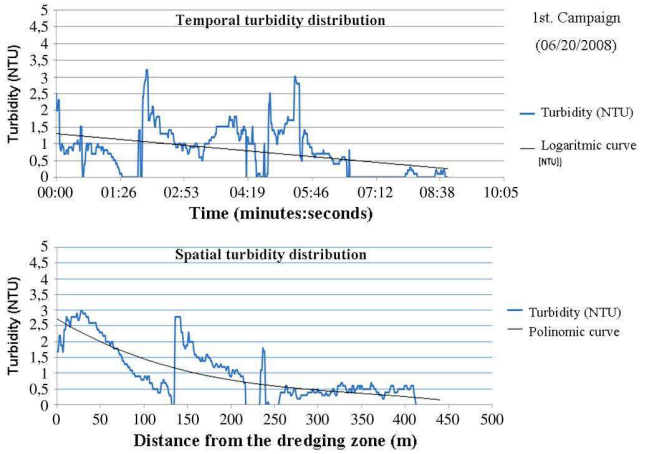


Fig. 4. Temporal and spatial turbidity distributions during the first campaign

causing only a short period of elevated turbidity (Parr et al. 1978). In another study of beach nourishment on North Carolina beaches during 2001 and 2002 (Versar 2004), it was concluded that plumes caused by sand placement and dewatering on the beach face were small, short-lived, and did not create large increases in turbidity over background conditions. Nonetheless, it is generally agreed that turbidity that results from placement of sand on the beach face in beach-nourishment projects is even more localized and transitory than that during offshore or enclosed-water operations. In some studies (Versar 2004), elevated turbidity was rarely observed outside the surf zone and was not discernable from normal turbidity caused by waves in the surf zone. In another study (CSMW 2004), elevated turbidity was limited to a narrow swath in the swash zone in the immediate vicinity of the operation. These results are largely attributable to the use of borrow material that is low in clay and silt and resembles the native beach sand as closely as possible.

In the dumping zone, turbidity values ranged between 0 and 10 NTU in the preoperational stage for all stations and the entire water column. For the following seven operational campaigns, the fixed stations showed that the turbidity had an isolated maximum value of 25 NTU at the surface and average values approximately 3 NTU throughout the water column (Fig. 6).

According to the World Health Organization (WHO 1998) of the European Union, with respect to the quality of potable water intended for human consumption, the turbidity level for surface water must be a maximum of 1.0 NTU at the exit of the water-treatment station. According to Ruffin (1998), the turbidity in a shallow water estuary in the Chesapeake Bay (Maryland) generally ranged from 28 to 121 NTU.

In general, no significant changes from their natural values were detected for the other physicochemical parameters (Table 3).

The averaged dissolved oxygen data show saturation values of approximately 111% in the dredging and the dumping zones in the preoperational stage for all stations and the entire water column, with SDs of 1.97 and 2.57%, respectively. For the following seven operational campaigns, the average dissolved oxygen values were on the order of 112.5%, with SDs of 0.22 and 0.87%, respectively. Nevertheless, a progressive decrease in dissolved oxygen with depth (−2%) was observed in the dredging zone, with constant values in the dumping zone of ~113%.

In the case of redox potential, the average values were very constant in the entire water column, with average data values of approximately 325 mV in the dredging zone and 305 mV in the dumping zone in the preoperational stage for all stations. For the remaining operating campaigns, the mean values were

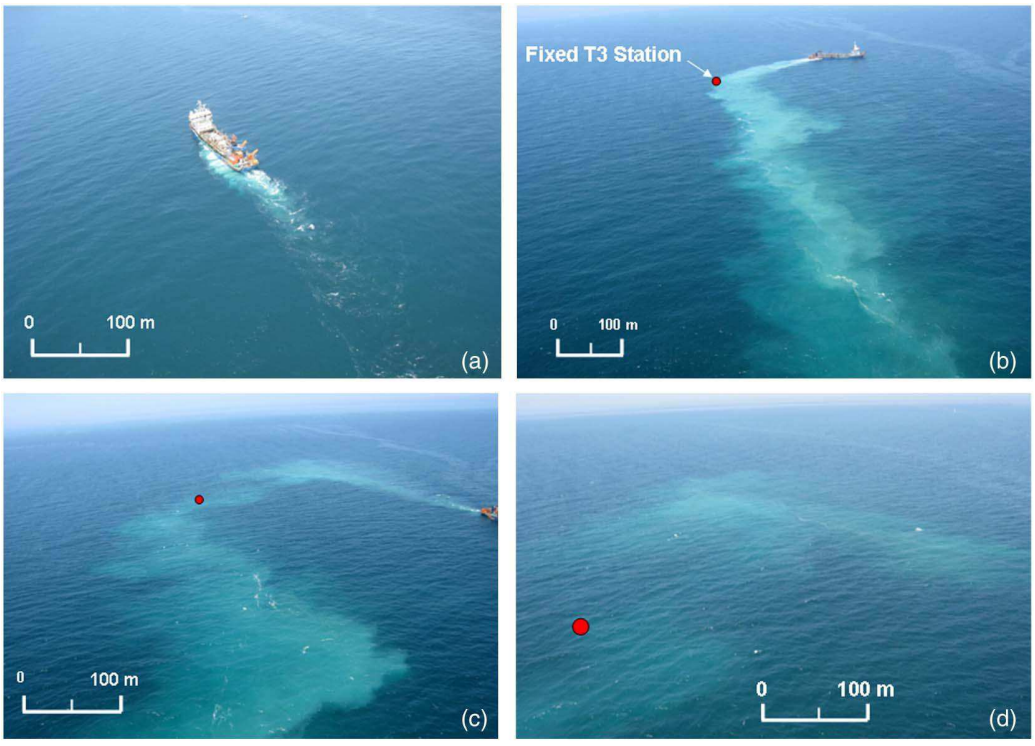


Fig. 5. Aerial photographs of the sediment plume and fixed stations in the Meca sandbank (images by Jorge Roman-Sierra): (a) start of dredging; (b) during dredging activities; (c) end of dredging; (d) after 10 min

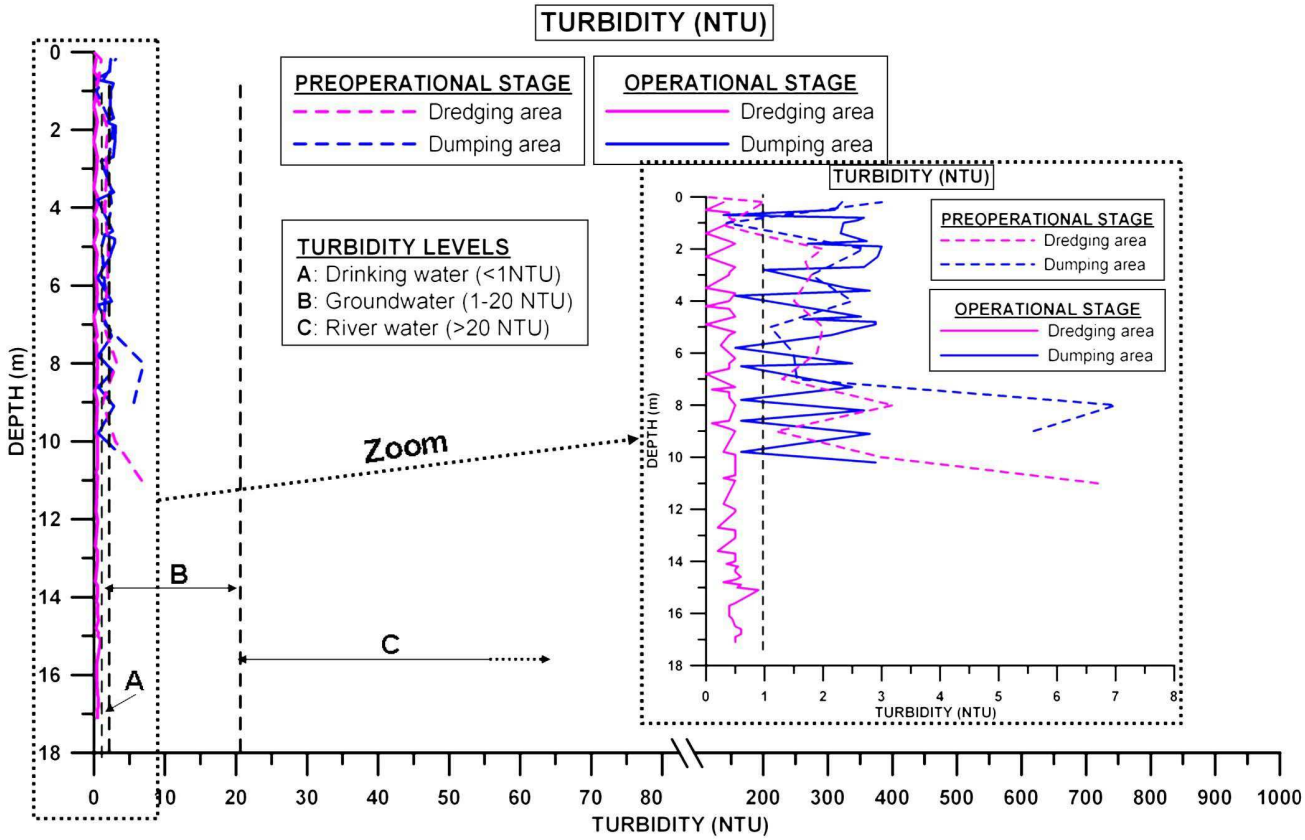


Fig. 6. Average turbidity values in preoperational and operational work stages

Table 3. Physicochemical Parameters Recorded at Dredging and Dumping Zones during Preoperational and Operational Campaigns

			Dissolved oxygen saturation (%)	Redox potential (mV)	Hydrogen potential (pH)	Salinity (‰)	Temperature (°C)
Dredging Zone	Preoperational	Average	111.35	325.09	8.37	36.81	17.11
		SD	1.97	14.56	0.19	0.25	0.30
		Max.	112.89	335.00	8.49	37.33	17.42
		Min.	109.25	315.00	8.21	36.55	16.90
	Operational	Average	112.56	336.49	8.21	37.48	18.84
		SD	0.22	7.43	0.01	0.05	0.90
		Max.	113.10	349.05	8.24	37.58	21.20
		Min.	111.22	334.43	8.20	37.43	17.46
Dumping Zone	Preoperational	Average	111.02	305.54	8.27	36.80	18.25
		SD	2.57	6.37	0.19	0.20	0.23
		Max.	114.90	310.00	8.39	37.25	18.80
		Min.	108.54	301.00	8.21	36.58	18.18
	Operational	Average	112.66	356.04	8.25	37.52	19.79
		SD	0.87	1.39	0.02	0.05	0.38
		Max.	114.70	358.00	8.28	37.69	21.01
		Min.	111.30	352.00	8.19	37.40	19.08

~336 mV in the dredging zone and 356 mV in the dumping zone, and the values were unvarying with depth.

The hydrogen potential (pH) showed the most constant value in the entire water column and throughout all the campaigns. In the preoperational stage, the average pH values in the dredging and dumping areas were between 8.27 and 8.37 (±0.1); the average pH values were very similar for all operational campaigns (±0.04).

The salinity parameter was recorded in the dredging area during the preoperational stage, showing an average value of 36.81‰. Afterward, throughout the operational campaigns the average salinity value was ~37.48‰ with an SD of 0.05‰. Around the dumping zone, the average salinity was 36.8‰ in the preoperational stage and 37.52‰ in the operational stage, with an SD of 0.05‰.

Table 4. Suspended-Sediment Concentrations (mg/L). S: Surface; B: Bottom

SSC (mg/L) Stations		Preoperational	Camp. 1	Camp. 2	Camp. 3	Camp. 4	Camp. 5	Camp. 6	Camp. 7
T1	S	< 2	< 2	< 2	< 2	5	< 2	< 2	2
	B	3	< 2	< 2	4	< 2	< 2	< 2	< 2
T2	S	< 2	< 2	< 2	4	3	< 2	< 2	< 2
	B	< 2	3	< 2	< 2	2	< 2	< 2	< 2
T3	S	< 2	< 2	< 2	2	< 2	< 2	< 2	5
	B	< 2	< 2	< 2	< 2	4	< 2	< 2	< 2
T4	S	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	5
	B	< 2	< 2	< 2	< 2	3	< 2	< 2	< 2
E4 (2 m depth)	S	< 2	6	< 2	4	< 2	< 2	< 2	< 2
	B	< 2	3	15	8	4	< 2	< 2	4
E4 (5 m depth)	S	2	< 2	< 2	< 2	3	< 2	< 2	4
	B	2	< 2	< 2	2	3	< 2	< 2	3
E4 (10 m depth)	S	< 2	7	3	< 2	4	< 2	< 2	< 2
	B	3	< 2	< 2	< 2	2	< 2	< 2	4
E5 (2 m depth)	S	3	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3
	B	< 2	2	8	< 2	< 2	< 2	< 2	3
E5 (5 m depth)	S	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2
	B	< 2	< 2	8	2	< 2	< 2	4	< 2
E5 (10 m depth)	S	< 2	4	< 2	< 2	5	< 2	< 2	3
	B	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2

For all stations, the maximum temperature was 17.42°C in the dredging zone and 18.80°C in the dumping zone on the sea surface during the preoperational stage. These values decreased with 10-m depth in the order of 0.5°C approximately. After 10 m, the temperature remained constant at approximately 16.90 and 18.18°C, respectively. During the operational campaigns, the minimum temperature increased between 1 and 2°C on the sea surface in the dredging and dumping zones. Moreover, the temperature decrease with depth was generally more in the first zone than in the dumping zone: 1.5 and 0.5°C, correspondingly. Nonetheless, the temperature decrease with depth was quite different at the same station depending on the day and deep ocean currents.

Table 4 shows the SSC (in mg/L) for all the stations in the dredging and dumping area in the natural stage of environment and all operational campaigns.

The SSC values obtained in Meca sandbank were very low (< 2 mg/L), almost always below the detection limit. Significant values of SSC of approximately 8 and 15 mg/L were only observed at depths of 2 and 5 m at the E4 and E5 profiles in the dumping area near the nourished beach. These values were one order of magnitude more than natural concentrations. Generally in this case, natural values during the preoperational campaign were very similar to the operational values obtained during the nourishment activities. Sea conditions (current velocity and wave height) seem to have had an important weight on the collected data and on interpretation of the results (Table 2). In other cases (CSMW 2004), SSCs were equivalent to natural levels during storms. Poststorm monitoring of the swash, surf, and near-shore zones indicated that beach sediments at both recently filled and undisturbed beaches were equally susceptible to resuspension. In the swash, surf, and near-shore zones adjacent to the newly restored beaches, SSCs were generally comparable to or slightly higher than those at undisturbed reference beaches. Only in a few samples from the swash zone of the nourished beach were SSCs markedly elevated (Burlas et al. 2001). According to Barnard (1978), SSC rapidly decreases with increasing distance downstream or downcurrent from the discharge point and laterally away from the plume centerline because of settling and horizontal dispersion of the suspended solids.

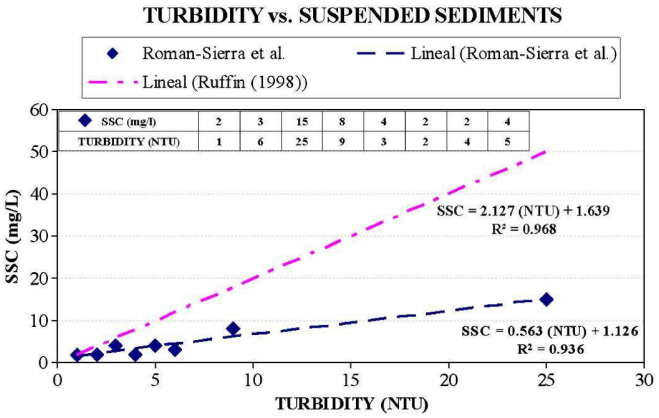


Fig. 7. Turbidity versus SSC in the dumping area for all work periods (data from Ruffin 1998)

According to Ruffin (1998), the values of turbidity (x) and total suspended solids (y) are closely correlated and can be described by the equation $y = 2.127x + 1.639$, with a correlation coefficient of $R^2 = 0.968$. In this case, the SSCs were in concordance with the low turbidity values. The equation relating them is reflected by the linear regression $\text{SSC} = 0.563(\text{NTU}) + 1.126$ in the scatter plot (Fig. 7), with a correlation coefficient of $R^2 = 0.936$. In contrast with Ruffin (1998), the elevated sand size and minimal percentage of silt and clay in the Meca sandbank sediment resulted in a much reduced concentration of suspended solids.

Marine-Sediment Characterization

Generally, during the preoperational campaign, the sediment characterization in the dredging and dumping zones showed average values of medium and coarse sands ($D_{50} = 0.33$ mm), with a

Table 5. Parameters of Sediment Composition

Parameters	Stations	Campaigns			
		Preoperational	3 months later	6 months later	12 months later
Fine content (%)	T1	0.86	1.43	1.80	1.80
	T2	1.01	1.43	0.60	3.10
	T3	0.71	1.27	1.00	2.00
	T4	1.43	1.78	1.10	3.10
	E4	0.07	1.64	0.90	3.00
	E5	1.81	1.46	0.80	2.10
SD (sorting)	T1	0.61	0.98	0.80	1.48
	T2	0.55	1.29	0.52	0.62
	T3	0.71	1.28	1.34	1.32
	T4	0.98	1.37	0.96	1.15
	E4	0.31	0.64	1.03	0.85
	E5	0.74	1.20	1.12	0.97
Symmetry (skewness)	T1	0.21	−0.42	−0.22	−0.21
	T2	0.32	−0.43	−0.14	−0.26
	T3	0.11	−0.12	−0.59	−0.22
	T4	−0.12	−0.32	−0.40	−0.26
	E4	0.14	−0.13	−0.28	−0.24
	E5	0.04	−0.17	−0.23	−0.18
D50 (mm)	T1	0.31	0.23	0.26	0.45
	T2	0.34	0.29	0.20	0.22
	T3	0.34	0.44	0.24	0.39
	T4	0.23	0.35	0.24	0.23
	E4	0.19	0.19	0.23	0.18
	E5	0.59	0.45	0.33	0.22
Organic matter (%)	T1	0.80	0.80	0.90	1.60
	T2	0.80	0.90	1.00	0.70
	T3	0.60	1.50	0.90	1.00
	T4	0.80	1.70	0.90	0.90
	E4	1.30	1.40	1.20	1.20
	E5	1.50	1.50	0.80	1.50

minimal composition of fine sands (approximately 0–2%). The only exception was for the sediment present at station E5, where the D_{50} was 0.59 mm, with the modal value indicating coarse sands. The D_{50} values were similar in the subsequent campaigns (approximately 0.29 mm), indicating a medium sand size with a fine content between 0.6 and 3.1%. There were a few samples (E5 and T3) with a D_{50} of 0.45 mm, but, in both cases, the sands had a medium size mode. All the values obtained for the different parameters and campaigns can be observed in Table 5. For an easy comparison of borrow sand and native beach sand, selected plots of size distribution are shown in Fig. 8.

In the preoperational campaign, the SD obtained (the sorting index) indicated that the sediments of the E4 station were well classified. The remaining sediment samples were moderately well classified except for the E5, T3, and T4 samples, which were moderately sorted (USACE 2008). In the following postoperational campaigns, the sorting indexes indicated that the sediment samples T3, T4, and E5 were moderately sorted. Samples T1 and T2 were moderately well sorted, and finally, sample E4 was very well sorted.

The skewness index obtained in the preoperational stage indicated a wide range of symmetry values for the sediments present in different stations. Sediments from station E5 followed a symmetrical distribution, whereas the T1, T3, and E4 samples had a

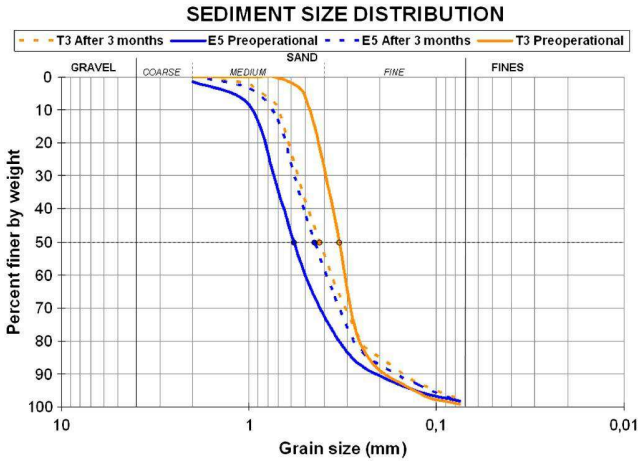


Fig. 8. Sediment distribution by using semilog paper: Stations T3 and E5 (during the preoperational stage and 3 months after works)

fine-skewed distribution. This indicated that there was a tailing out toward the fine sediments (USACE 2008). Finally, the sediment of the T2 sample showed a very fine-skewed distribution and T4 showed a very coarse-skewed distribution (indicating more outliers in the coarser sediments). In the postoperational campaigns, the averaged skewness index indicated that generally all stations showed a coarse-skewed distribution. The T3 sample showed a very coarse-skewed distribution.

The proportion of oxidizable organic matter in the sediment was very low, with an average value of 0.97% and a maximum value of 1.50%. During the posterior monitoring campaigns, the average value of organic matter was 1.13% with a maximum value of 1.70%.

The content of fine organic matter was very low for all stations, with an average value of 0.98% and a maximum value of 1.81% in the preoperational stage. During the next campaigns, the organic matter had an average value of 1.68% and a maximum value of 3.10% at the T2 and T4 stations 12 months after the dredging activities.

The percentage of sediment remaining in suspension with time depends predominantly on the relative proportions of each grain-size fraction in the local bed sediments (Black and Parry 1999). The fine particles in a plume are advected by the current and also undergo settling. Coarser sediments will be transported a lesser distance away from the point of discharge (CSMW 2004). Noncohesive sediments, or those greater than sand size (> 2 mm), are generally considered to fall to the seabed immediately (Hitchcock et al. 1999). The duration of turbidity in water is largely based on the falling velocity of the sediment particles. Falling velocity depends on size, shape, density of the particles, the fluid density, viscosity, and several other parameters. When a particle falls through water, it accelerates until it reaches its falling or settling velocity. This is the terminal velocity that a particle reaches when the (retarding) drag force on the particle just equals the (downward) gravitational force (USACE 2008).

In the case of the Meca sandbank and Palmar Beach, the medium-sized sand (0.33–0.45 mm) and marine conditions in the area suggest a dispersion time of approximately 9 min within a surface plume of 400 m. In this sense, according to Muñoz-Perez et al. (1999), the quick disappearance of coarse and very fine sand is related to the response of these fractions to wave-induced current effects. According to Vanoni (1975), the theoretical falling velocity of sediment particles composed primarily of quartz (i.e., medium-sized sand approximately 0.33 mm) is approximately

Table 6. Average Ecological Indexes Monitored at All Zones for One Year

Stations	Campaigns	Average Ecological Indexes				
		N of species (S)	Diversity (H′)	Equitability (J′)	Dominance (D)	Complexity (N of phylum)
T1 zone	Preoperational	3.00	1.10	1.00	0.00	3.00
	3 months later	3.00	0.90	0.80	0.40	2.00
	6 months later	4.00	1.30	1.00	0.10	4.00
	12 months later	5.00	1.20	0.70	0.40	4.00
T2 zone	Preoperational	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00
	3 months later	3.00	1.00	0.90	0.30	2.00
	6 months later	2.00	0.60	0.80	0.50	2.00
	12 months later	6.00	1.50	0.90	0.20	2.00
T3 zone	Preoperational	3.00	1.00	0.90	0.30	2.00
	3 months later	0.00	0.00	—	—	0.00
	6 months later	2.00	0.70	1.00	0.00	1.00
	12 months later	7.00	1.60	0.80	0.20	3.00
T4 zone	Preoperational	3.00	1.10	1.00	0.20	1.00
	3 months later	0.00	0.00	—	—	0.00
	6 months later	6.00	1.60	0.90	0.20	1.00
	12 months later	6.00	1.70	0.90	0.10	2.00
E4 zone	Preoperational	3.00	1.00	0.90	0.30	2.00
	3 months later	8.00	1.70	0.80	0.20	3.00
	6 months later	3.00	0.80	0.70	0.50	2.00
	12 months later	3.00	0.70	0.70	0.60	2.00
E5 zone	Preoperational	2.00	0.70	1.00	0.40	1.00
	3 months later	3.00	0.60	0.60	0.60	2.00
	6 months later	6.00	1.40	0.80	0.30	3.00
	12 months later	4.00	1.10	0.80	0.30	3.00

3.8 cm/s in water. The falling time of the sediment in the Meca sandbank, at 18-m depth, was approximately 8 min and 30 s. These values are in agreement with the values obtained in the turbidity temporal and space studies.

Benthic-Community Characterization

This investigation monitored various ecological indexes in the dredging and dumping zones to determine the ecological environmental effects (differentiating the sedimentary and rocky zones). The results obtained from submarine biosphere monitoring are shown in Table 6.

In the preoperational stage, the values obtained for the number of species, diversity, and complexity are very low (a range of 1 to 5) compared to how these indexes would be for this kind of marine environment (Gonzalez et al. 2008). The submerged Meca sandbank always displays harsh dynamic conditions for benthic communities because of its mobile and unconsolidated nature. These features account for the natural low biological diversity of the ocean floor in this area (Ministry of Environment 2003). The results obtained in the dumping area for the subsequent campaigns, although low, can be considered within the normal range for all campaigns because a decrease was not observed. Moreover, an absence of organisms was observed in the dredging area at T3 and T4 zones after 3 months. This decrease was expected after the extraction because of the removal of the surface layer of sand inhabited by the biota. Nevertheless, the values obtained in the extraction area exceeded those obtained in the preoperational stage. This suggests, in biological terms, a complete recovery of the biological community at all stations after 6 months.

Sedimentary area results are as follows:

- Communities located on natural sedimentary substrata showed a low degree of development in both dredging and dumping areas.
- A minimum decrease of ecological richness was identified in the dredging area after the sand extraction.
- A complete recuperation of the dredging area was observed 6 months after the dredging.
- In the dumping area, disturbances in the benthonic communities during the operations were considered minimal, recovering biological equilibrium 1 year after the operation.

Rocky-area results are as follows:

- A medium degree of development was observed in the preoperational states of the biological communities.
- A decrease in ecological fragility was identified in the coastal areas, 6 months after the operations. This decrease was probably because of the disappearance of certain algal species during the summer season (Raffaelli and Hawkins 1999).
- The ecological indexes were similar to those obtained during the preoperational state at all the monitoring stations 1 year after the operations. This finding suggests that the disturbances produced in the rocky-area biological communities were assimilated by the marine environment during this period and their ecological states were completely recovered.

Conclusions

The Spanish Coastal Authority recently completed one of the largest beach-nourishment projects of the past decade, placing 595,000 m^3 of medium-sized sand sourced from the Meca sandbank along 4 km of the high-energy El Palmar Beach (southwest Cadiz). Dredging and dumping operations were monitored in this study following a new research line. The methods were aimed at assessing several physical and chemical parameters before, during, and after the operations at the various dredging and dumping areas.

Thus, turbidity, SSC, salinity, dissolved oxygen, pH, temperature, redox potential, sediment quality, and ecological variables were recorded to determine the environmental effects.

After a spatial and temporal turbidity study, it was concluded that turbidity decreased with time, reaching natural conditions approximately 9 min after the operations. Turbidity values became normalized at a spatial scale between 250 and 400 m away from the dredging zone. These results evidenced that dredging activities resulted in a minimal effect on water quality. Because of the low turbidity values recorded at all fixed stations, the turbidity plume had no significant temporal or spatial dispersion. In this sense, sea conditions (current velocity and wave height) seem to have important effects on data collection and the interpretation of results.

During the dredging and nourishment operations, SSCs in the surf zone ranged from < 2 to 15 mg/L; they were also analogous to those collected in the preoperational phase. In addition, salinity, pH, dissolved oxygen, temperature, and redox potential showed no abnormal variations from those found in normal conditions.

Dredging effects on aquatic flora were determined to be reversible. After the operations, ecological indexes were similar to those obtained during the preoperational state for all the monitoring stations, suggesting minimal disturbances to the sedimentary and rocky biological communities. These ecosystems completely recovered their ecological states 1 year and 6 months after the operations for the sedimentary and rocky biological communities, respectively.

As a general conclusion, the dredging and discharge of sand did not increase the overall turbidity of the waters and sediments that were studied. Moreover, these works did not worsen the quality of the hydrological and ecological environment. The high erosion rates identified on this coastline and the minimal environmental effect resulting from the dredging activities conducted during this research, appear to justify the use of dredging activities for beach-nourishment purposes. As a result, useful social benefits have been derived from its use.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Coastal General Directorate of the Spanish Ministry of Environment and Tecnoambiente, S.L., both in Cadiz, for their support throughout the development of this research.

References

Anfuso, G., and Gracia, F. J. (2005). "Morphodynamic characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: Implications for coastal erosion management." *J. Coastal Res.*, 21(6), 1139–1153.

ASTM. (1992). "Standard test methods for particle size analysis of soils." *04.08, Soil and Rock (1)*, *D420–D4914*, Philadelphia.

Barnard, W. D. (1978). "Prediction and control of dredged material dispersion around dredging and open-water pipeline disposal operations." *Technical Rep.*, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 78–113.

Black, K. P., and Parry, G. D. (1994). "Sediment transport rates and sediment disturbance due to scallop dredging in Port Phillip Bay." *Mem. Queensl. Mus.*, 36(2), 327–341.

Black, K. P., and Parry, G. D. (1999). "Entrainment, dispersal, and settlement of scallop dredge sediment plumes: Field measurements and numerical modelling." *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56(12), 2271–2281.

Brenon, I., and Le Hir, P. (1999). "Modelling the turbidity maximum in the Seine Estuary (France): Identification of formation processes." *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 49(4), 525–544.

Burlas, M., Ray, G., and Clarke, D. (2001). *The New York District's biological monitoring program for the Atlantic Coast of New Jersey, Asbury Park to Manasquan Section Beach Erosion Control Project*, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

California Coastal Sediment Management Workgroup (CSMW). (2004). California Resources Agency and U. S. Army Corps of Engineers (South Pacific Division). ⟨http://www.spd.usace.army.mil/csmwonline/index.htm⟩.

Dabrio, C. J., et al. (2000). "Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression (Gulf of Cadiz, Southern Spain)." *Mar. Geol.*, 162(2-4), 381–404.

Drucker, B. S., Waskes, W., and Byrnes, M. R. (2004). "The, U. S. Minerals Management Service outer continental shelf sand and gravel program: Environmental studies to assess the potential effects of offshore dredging operations in federal waters." *J. Coastal Res.*, 20(1), 1–5.

Giardino, A., Ibrahim, E., Adam, S., Toorman, E. A., and Monbaliu, J. (2009). "Hydrodynamics and cohesive sediment transport in the Ijzer estuary, Belgium: Case study." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 135(4), 176–184.

Gomez-Pina, G., Fages, L., Ramirez, J. L., Muñoz-Perez, J. J., and Enriquez, J. (2006). "A critical review of beach restoration projects in the northern coast of Cadiz (Spain) after thirteen years." *30th Int. Conf. on Costal Engineering*, ASCE, Reston, VA, 4167–4178.

Gonzalez, A. R., et al. (2008). "Community structure of caprellids (Crustacea: Amphipoda: Caprellidae) on seagrasses from southern Spain." *Helgol. Mar. Res.*, 62(3), 189–199.

Goodwin, C., and Michaelis, D. (1984). "Appearance and water quality of turbidity plumes produced by dredging in Tampa Bay, Florida, U. S." *Geological Survey Water-Supply Paper 2192*, U.S. Geological Survey, Reston, VA.

Herbich, J. B. (1992). *Handbook of dredging engineering*, McGraw-Hill Professional, New York, 992.

Hitchcock, D. R., and Bell, S. (2004). "Physical impacts of marine aggregate dredging on seabed resources in coastal deposits." *J. Coastal Res.*, 20(1), 101–114.

Hitchcock, D. R., Newell, R. C., and Seiderer, L. J. (1999). "Marine aggregate mining benthic and surface plume study." *Rep. for the U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service*, Coastline Surveys Ltd, Gloucestershire, UK.

Iannuzzi, T. J., Weinstein, M. P., Sellner, K. G., and Barrett, J. C. (1996). "Habitat disturbance and marina development: An assessment of ecological effects. Changes in primary production due to dredging and marina construction." *Estuaries*, 19(2), 257–271.

Kennedy, A. B., Slatton, K. C., Starek, M., Kampa, K., and Cho, H-C. (2010). "Hurricane response of nearshore borrow pits from airborne bathymetric lidar." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 136(1), 46–58.

Lewis, M. A., Weber, D. E., Stanley, R. S., and Moore, J. C. (2001). "Dredging impact on an urbanized Florida bayou: Effects on benthos and algal-periphyton." *Environ. Pollut.*, 115(2), 161–171.

Lloyd, M., and Ghelardi, R. J. (1964). "A table for calculating the 'equitability' component of species diversity." *J. Anim. Ecol.*, 33(2), 217–225.

Long, B. G., Dennis, D. M., Skewes, T. D., and Poiner, I. R. (1996). "Detecting an environmental impact of dredging on seagrass beds with a BACIR sampling design." *Aquat. Bot.*, 53(3–4), 235–243.

Lyngby, J. E., and Mortensen, S. M. (1996). "Effects of dredging activities on growth of laminaria saccharina." *Mar. Ecol.*, 17(1-3), 345–354.

Ministry of Environment. (2003). "Environmental impact study: Use of Meca sandbank to Cadiz beach nourishment." *Resolution of the General Secretariat of the Environment*, *BOE 108*, 17266–17270 (in Spanish).

Muñoz-Perez, J. J. (2008). "Artificial reefs to improve and protect fishing grounds." *Recent Pat. Eng.*, 2(2), 80–86.

Muñoz-Perez, J. J., Gutiérrez-Mas, J. M., Moreno, J., Español, L., Moreno, L., and Bernabeu, A. (2003). "Portable meter system for dry weight control in dredging hoppers." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 129(2), 79–85.

Muñoz-Perez, J. J., Gutiérrez-Mas, J. M., Parrado, J. M., and Moreno, L. (1999). "Sediment transport velocity by tracer experiment at Regla Beach (Spain)." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 125(6), 332–335.

Muñoz-Perez, J. J., Lopez, B., Gutierrez-Mas, J. M., Moreno, L., and Cuena, G. J. (2001). "Cost of beach maintenance in the Gulf of Cadiz (SW Spain)." *Coastal Eng.*, 42(2), 143–153.

Muñoz-Perez, J. J., Navarro, M., Roman-Sierra, J., Tejedor, B., Rodriguez, I., and Gomez-Pina, G. (2009). "Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method." *Geomorphology*, 112(1-2), 167–177.

Onuf, C. P. (1994). "Seagrasses, dredging and light in Laguna Madre, Texas, U. S. A." *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 39(1), 75–91.

OSPAR Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic. (2003). *Guidelines for the management of marine sediment extraction*, International Council for the Exploration of the Sea (ICES), Copehagen, Denmark.

Parr, T., Diener, D., and Lacy, S. (1978). "Effects of beach replenishment on the nearshore sand fauna at Imperial Beach, California." *Miscellaneous Rep. 78-4*, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA.

Pennekamp, J. G. S., et al. (1996). "Turbidity caused by dredging; Viewed in perspective." *Int. J. Public Works, Ports, Waterw. Dev.*, 64, 10–17.

Raffaelli, D., and Hawkins, S. (1999). *Intertidal ecology*, Chapman & Hall, London.

Robinson, J. E., Newell, R. C., Seiderer, L. J., and Simpson, N. M. (2005). "Impacts of aggregate dredging on sediment composition and associated benthic fauna at an offshore dredge site in the southern North Sea." *Mar. Environ. Res.*, 60(1), 51–68.

Ruffin, K. K. (1998). "The persistence of anthropogenic turbidity plumes in a shallow water estuary." *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 47(5), 579–592.

Spanish Port System. (2008). "Oceanography and meteorology data base." ⟨www.puertos.es⟩.

Teeter, A. M. (1988). "Clamshell-dredge overflow plume evaluation." *Proc., 21st Annual Dredging Seminar*, Wilmington, NC, 94–110.

UNE—EN. (1999). "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories." *ISO/IEC 17025*, International Organization for Standardization.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2008). "Coastal sediment properties." *Coastal Engineering Manual—Part III, EM 1110-2-1100*.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) and U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). (1992). *Evaluating environmental effects of dredged material management alternatives: Technical framework*, Washington, DC.

Vanoni, V. A. (1975). "Sedimentation engineering." *Manual No. 54*, ASCE, Reston, VA.

Versar, I. (2004). "Year two recovery from impacts of beach nourishment on surf zone and nearshore fish and benthic resources on Bald Head Island, Caswell Beach, Oak Island, and Holden Beach, North Carolina." U.S. Army Corp of Engineers (USACE), Wilmington District.

Wilber, D. H., and Clarke, D. G. (2001). "Biological effects of suspended sediments: A review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries." *North Am. J. Fisheries Manage.*, 21(4), 855–875.

Winterwerp, J. C. (2002). "Near-field behaviour of dredging spill in shallow water." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 128(2), 96–98.

Wolanski, E., Gibbs, R., Didd, P., and Mehta, A. (1992). "Settling of ocean dumped dredging material Townsville, Australia." *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 35(5), 473–489.

Work, P. A., Fehrenbacher, F., and Voulgaris, G. (2004). "Nearshore impacts of dredging for beach nourishment." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 130(6), 303–311.

World Health Organization (WHO). (1998). "Drinking water directive." *Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption*, Environment European Commission.