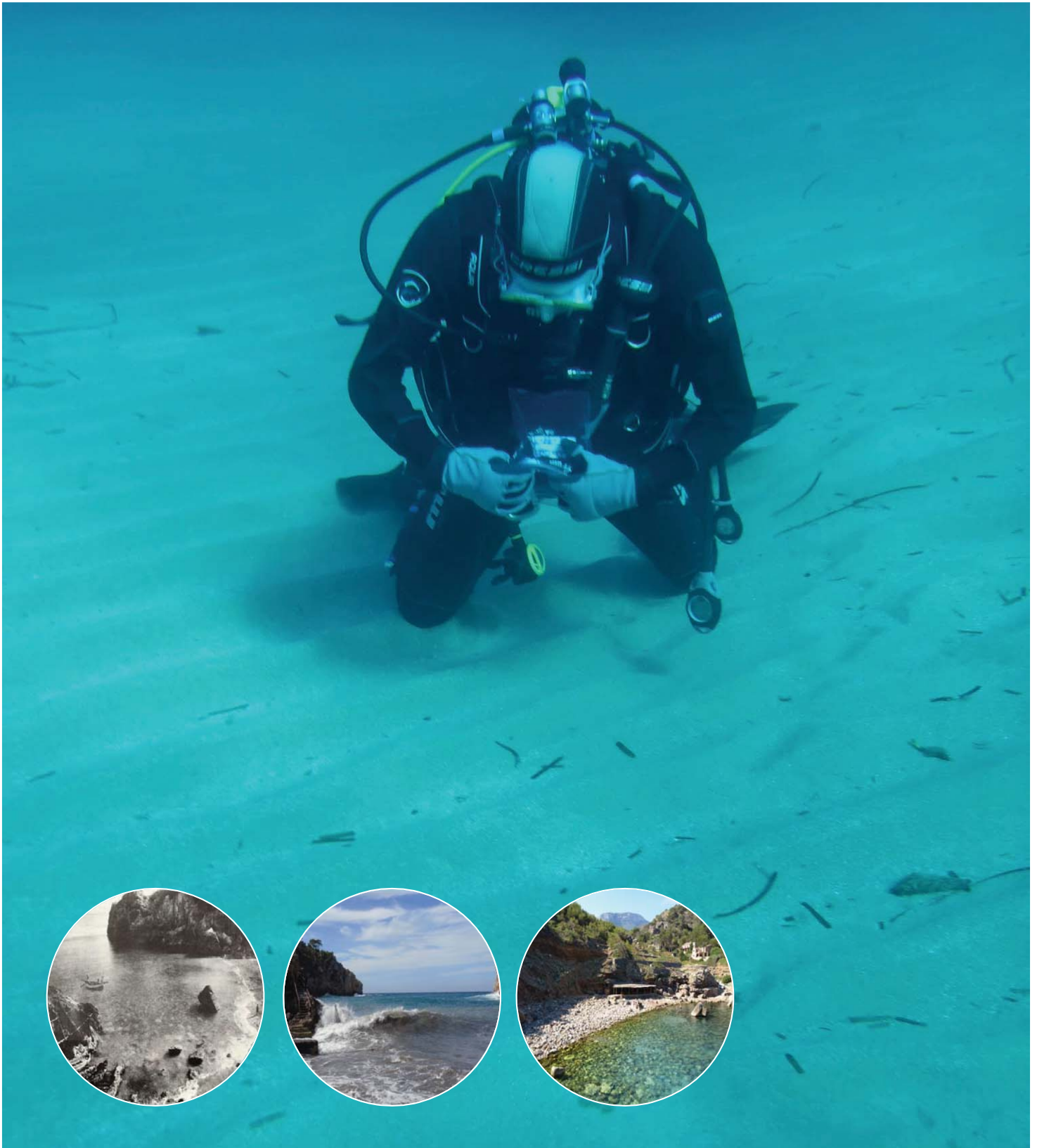


ESTUDIO MORFODINÁMICO DE CALA DEIÀ

DICIEMBRE 2015



tmoos tecnología marina
oceanografía operacional
y sostenibilidad

 **IMEDEEA**
Institut Mediterrani d'Estudis Avançats

 **CSIC**
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

 **Universitat**
de les Illes Balears

SOCIB Balearic Islands
Coastal Observing
and Forecasting
System

 GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD

 **Govern**
de les Illes Balears

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	3
1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO	4
2. PRODUCTOS DEL ESTUDIO	6
3. PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO	7
4. LOCALIZACIÓN Y CONTEXTO FISIAGRÁFICO	9
5. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLAYA SECA	15
5.1 MATERIALES Y MÉTODOS	15
5.2 RESULTADOS	17
6. CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO.	22
7. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN MEDIO	25
8. CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN EXTREMAL.....	27
9. SIMULACIONES NUMÉRICAS DE OLEAJE.	29
10. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO	31
10.1 MATERIALES Y MÉTODOS	31
10.2 CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DE LA PLAYA SUMERGIDA	32
10.3 CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DE LA PLAYA EMERGIDA	34
11. MODELO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLAYA.....	36
11.1 ESQUEMA DE FORMACIÓN DE LA PLAYA	36
11.2 EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA	37
BIBLIOGRAFÍA.....	40
ANEXO 1. BATIMETRÍA DE DETALLE EN CALA DEIÀ.	41

Resumen ejecutivo

En abril de 2015 el Ayuntamiento de Deià se dirigió al Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados – IMEDEA (CSIC-UIB) y al SOCIB (MINECO-CAIB) ante la necesidad de objetivar con datos científicos los indicios de retroceso de la costa, así como la necesidad de entender la dinámica y el modelo de funcionamiento de la playa de Cala Deià como paso previo y base para su gestión.

El presente trabajo, realizado entre mayo y diciembre de 2015, es el resultado de la del análisis de la morfodinámica (oleaje y sedimentos) y variabilidad de la playa de Cala Deià a partir de la caracterización de la evolución de la playa seca y las tasas de cambio de la línea de costa.

Se constata que en el período 1956-2015 la playa emergida de Cala Deià ha experimentado diferentes ciclos de acreción-erosión, destacando el retroceso de la playa asociado a los temporales extremos de 1980 y 2001. En la década de los noventa la playa emergida alcanzó su superficie máxima debida a las aportaciones externas de sedimento de origen antrópico procedentes del torrent Major y a un clima marítimo menos energético. Desde el 2001 la playa viene experimentado un retroceso de su superficie asociada al efecto de los eventos extremos, como el de noviembre de 2001, y a un incremento anual del número de temporales con altura significativa superior a 2 m.

Los efectos de los temporales extremos han resultado en el transporte del sedimento medio y fino a unas profundidades (ca. 10 m) de las que el oleaje menos energético, que sería el que habitualmente transporta ese sedimento hacia tierra, difícilmente podría reincorporar el sedimento a la playa emergida. A todo ello se une la complejidad de la batimetría de la playa y el efecto de los campos de bloques sobre la atenuación del oleaje y su capacidad de transporte hacia tierra.

Todo ello apunta a que la superficie de la playa emergida actual, dado el calibre del sedimento expuesto, difícilmente podrá seguir reduciendo su superficie aunque se encuentra en el mínimo de la serie desde que se dispone de datos. No obstante la recuperación de la superficie de la playa a valores previos a 2001 –dadas las condiciones energéticas y las características del sedimento– no se producirá de forma natural.

Cualquier intervención de gestión debe considerar el papel frecuente de los eventos con altura > 2m, la naturaleza del sedimento y sus características, así como el papel de los eventos extremos superiores a los 10 m de Hs con periodos de retorno de 20 años.

1. Antecedentes y objetivos del estudio

Cala Deià está situada en la costa noroccidental de la Isla de Mallorca, se trata de una playa encajada de gravas y bloques de apenas 800 m de longitud al pie de un acantilado sedimentario.

Observadores locales de la zona, así como los miembros del consistorio del municipio de Deià afirman que en los últimos años se ha producido una disminución significativa de la playa.

En abril de 2015 el Ayuntamiento de Deià se dirigió al Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados – IMEDEA (CSIC-UIB) ante la necesidad de objetivar con datos científicos los indicios de retroceso de la costa, así como la necesidad de entender la dinámica y el modelo de funcionamiento de la playa de Cala Deià como paso previo y base para su gestión.

El presente trabajo, realizado entre mayo y diciembre de 2015, es el resultado de la encomienda del Ayuntamiento de Deià al Departamento de Tecnologías Marinas, Oceanografía Operacional y Sostenibilidad del IMEDEA (CSIC-UIB) y al Departamento de Monitorización de Playas del SOCIB (MINECO-CAIB). En dicho trabajo se analiza la morfodinámica (oleaje y sedimentos) y variabilidad de la playa de Cala Deià. El trabajo se ha realizado con la expectativa que pueda servir como base sobre la que se desarrollen futuros estudios y aproximaciones que permitan diseñar estrategias de gestión sostenibles y basadas en el conocimiento científico de la playa.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- **Objetivo 1:** Caracterizar la evolución histórica de la playa.
 - Para lo que se ha recopilado y analizado información sobre las características históricas de la playa (bibliografía, fotografías, testimonio oral) y se ha procedido al análisis de la fotografía aérea y ortofotografía para el período 1956-2015.
- **Objetivo 2:** Analizar el estado actual de la playa.
 - Análisis de la superficie, tipo de fondo y batimetría mediante técnicas topográficas y acústicas.
- **Objetivo 3:** Estudio de los factores principales que influyen en la dinámica de la playa.
 - Caracterización del sedimento.
 - Caracterización del oleaje durante el período de estudio.
 - Estudio estadístico del clima marino.
 - Simulación numérica de los patrones de corrientes, oleaje y transporte de sedimento asociado.
- **Objetivo 4:** Elaborar un diagnóstico del estado actual de la playa y proponer un modelo de funcionamiento de la playa que sirva de base para su gestión.

El presente documento consta de ocho partes diferenciadas: en primer lugar una descripción y contextualización fisiográfica de la playa, a la que siguen seis secciones temáticas con los resultados del estudio. En cada una de dichas secciones se dará cuenta de los métodos y materiales utilizados. La primera de las secciones temáticas aborda la evolución y estado actual de la playa y le siguen el estudio y la caracterización del oleaje para el periodo de estudio, el análisis del régimen medio, seguido del extremal y de la simulación numérica del oleaje y la caracterización del sedimento. Cerrará el documento una sección destinada a la elaboración del modelo de funcionamiento de la playa.

2. Productos del estudio

- Topo-batimetría de Cala Deià (junio-agosto 2015)
- Caracterización del sedimento en playa seca y sumergida (agosto-noviembre 2015)
- Recopilación y georreferenciación de fotografías históricas de Cala Deià (desde 1956 hasta 2015)
- Análisis de la variabilidad de la superficie de la playa seca para el período 1956-2015.
- Análisis de oleaje y corrientes a 17 m de profundidad entre junio y diciembre de 2015.
- Caracterización del clima marítimo y régimen extremo de Cala Deià.
- Simulaciones numéricas de oleaje y corrientes.
- Modelo conceptual de funcionamiento de la playa.

3. Participantes en el estudio

En la elaboración del presente estudio han participado:

- Dr. Alejandro Orfila, Dr. en Oceanografía Física, Científico Titular del CSIC. Investigador principal y responsable del estudio.
- Dr. Lluís Gómez-Pujo, Dr. en Geografía Física, Co-Investigador principal. Responsable de la Beach Monitoring Facility del SOCIB. Coordinador de las campañas de campo, levantamientos topo-batimétricos, muestreo sedimentos, análisis de dinámica litoral y sedimentología.
- Dra. Amaya Álvarez, Dra. en Ciencias del Mar, Técnico superior del SOCIB. Simulaciones numéricas oleaje y corrientes, caracterización clima marino.
- Dr. Joaquín Tintoré, Dr. en Oceanografía Física, Profesor de Investigación del CSIC y Director del SOCIB. Análisis físico y diseño funcionamiento de la playa.
- Sr. Benjamín Casas, Ldo. Ciencias del mar, Técnico instrumentación CSIC. Levantamientos topo-batimétricos, muestreo sedimentos, despliegue Awac.
- Dr. Pau Balaguer, Dr. Geografía Física, Técnico instrumentación del SOCIB. Levantamientos topo-batimétricos, muestreo sedimentos, despliegue Awac.
- Sr. Nikolas Wirth, Ldo. Ing. Industrial, Técnico instrumentación del SOCIB. Levantamientos topo-batimétricos, muestreo sedimentos, despliegue Awac.
- Sra. Irene Lizarán, Titulado medio, Técnico instrumentación del SOCIB. Levantamientos topo-batimétricos, muestreo sedimentos, despliegue Awac.
- Sra. Montse Compa, Lda. Biología, Técnico superior del SOCIB. Fotogrametría y Sistemas de Información Geográfica.
- Sr. Tomàs Alemany, Estudiante Geografía en Prácticas de la UIB en SOCIB. Morfometría y morfoscopia bloques playa seca.
- Sr. Tomàs Salom, Estudiante Geografía en Prácticas de la UIB en SOCIB. Muestreo sedimento y granulometrías.
- Sr. Alberto Zamora, Estudiante Geografía en Prácticas de la UIB en SOCIB. Muestreo sedimento y granulometrías.

Quisiéramos agradecer la colaboración que nos ha prestado el Ayuntamiento de Deià en la recopilación de información histórica (en particular a I. Moya y J. Simonet) así como a los trabajadores y propietarios de Can Lluc que nos han

proporcionado fotografía histórica y testimonio de los efectos de eventos extremos en la Cala. Finalmente quisiéramos agradecer la colaboración de Puertos del Estado que nos ha proporcionado la serie temporal de oleaje en profundidad de la base de datos SIMAR utilizada en el presente estudio.

4. Localización y contexto fisiográfico

Cala Deià es una pequeña ensenada situada en la costa noroccidental de la isla de Mallorca al pie de la Serra de Tramuntana (Fig. 1). La cala constituye el accidente más destacado y la nota discordante en un sector de costa –de apenas 4 km de recorrido– con un marcado carácter lineal que queda comprendido entre los cabos de la punta de Deià y el accidente de la punta des Gall o des Dolç, al W de los relieves de Muleta. Dicho sector está caracterizado por una costa acantilada en las que abundan los ejemplos de movimientos de masas y deslizamientos de taludes asociados a la alternancia de roquedos duros jurásicos y capas de materiales plásticos del Triásico (Balaguer, 2006).

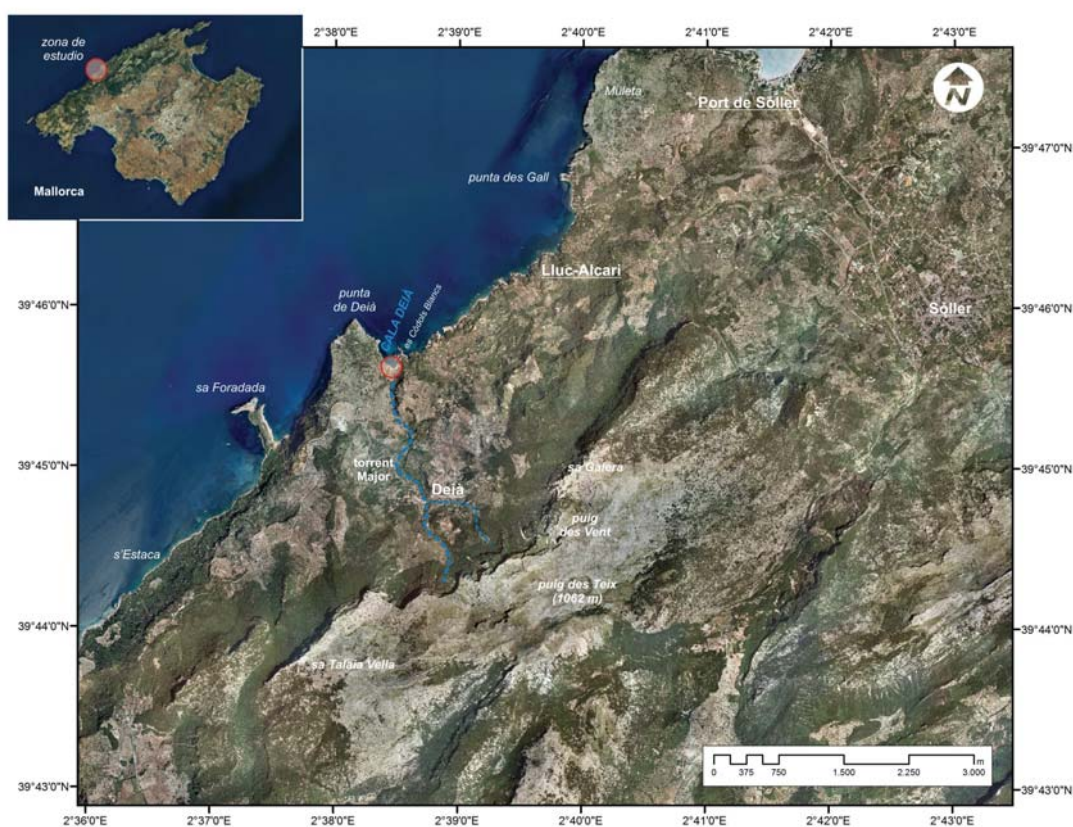


Fig. 1. Localización de Cala Deià en la costa norte de la isla de Mallorca y principales accidentes geográficos.

En el extremo occidental de dicho sector, a cobijo de la planicie de sa Pedrissa, se encuentra la ensenada de Cala Deià. Su entrada la delimitan la punta de Deià y los islotes de es Còdols Blancs, con una anchura de 203 m desde es Morral hasta el mayor de los islotes de es Còdols Blancs, y una profundidad aproximada de 305 m hasta la playa de bloques que se aloja en el fondo de la bahía (Fig. 2).

En su zona más cercana a la costa puede observarse una batimetría de pendiente acentuada (~15%) –en apenas 10 m desde la línea de costa, la cota desciende hasta 1,5m de profundidad– e irregular, asociada a la presencia de rocas, escollos, grandes bloques y otros clastos de dimensiones menores (Fig. 3). A partir de los 2 m de profundidad la pendiente de la ensenada se atenúa y mantiene constante a

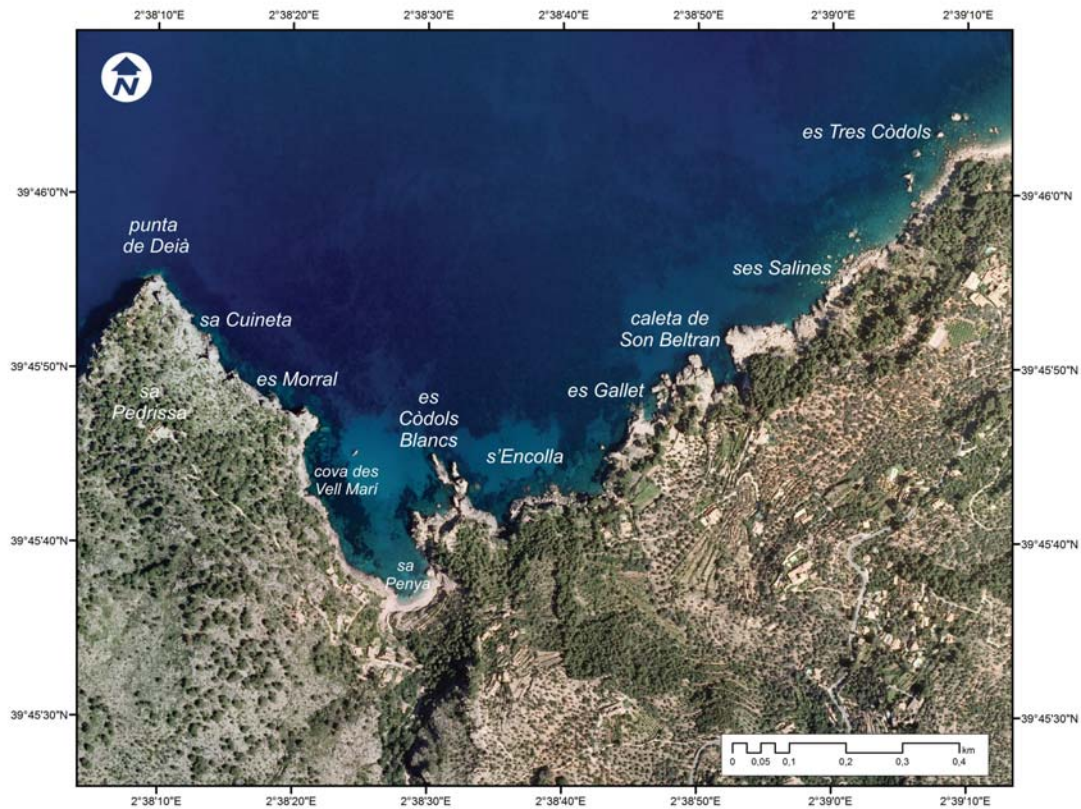


Fig. 2. Cala Deià y su ámbito cercano, accidentes geográficos y toponimia.

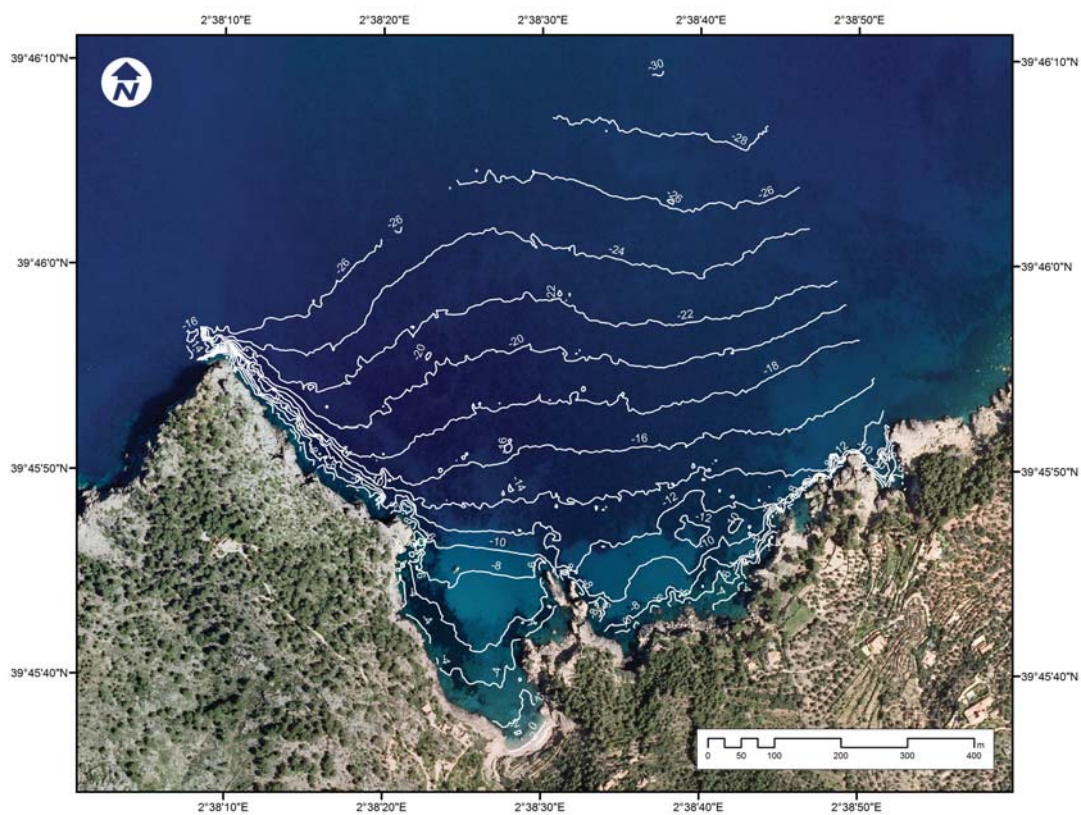


Fig. 3. Batimetría de Cala Deià.

razón de un 4%. Entre los 7 y los 9 m de profundidad puede apreciarse un cambio en la pendiente ($\sim 2\%$), pasando de un perfil cóncavo a uno convexo, coincidiendo con la presencia de un prisma de materiales arenosos con una importante componente de arenas y gravas terrígenas y una menor presencia de elementos biogénicos (Fig. 3). A partir de los 10 m de profundidad la pendiente vuelve a mantenerse constante en torno al 4% recuperando el perfil cóncavo (Fig. 4).

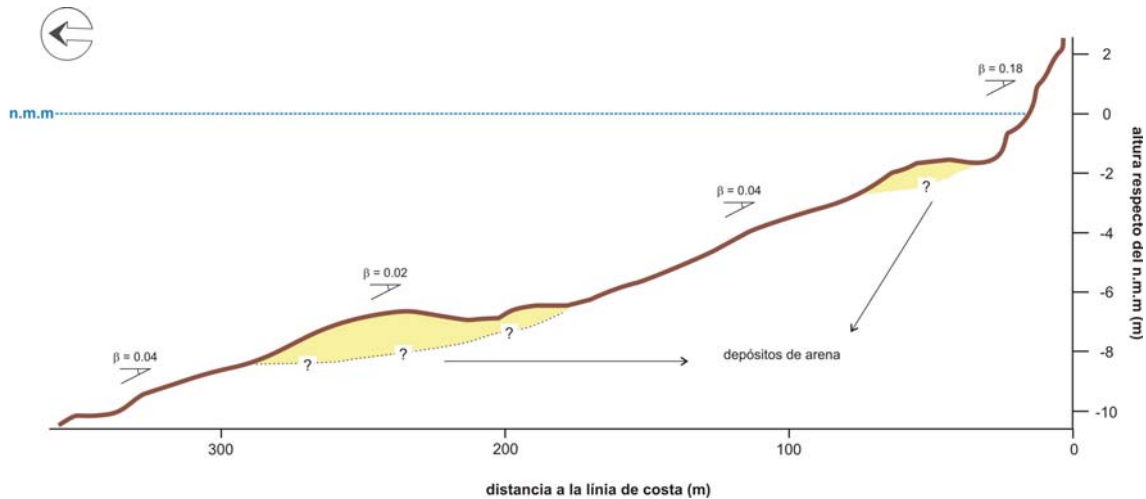


Fig. 4. Perfil topo-batimétrico de Cala Deià.

En cuanto a los fondos de la ensenada (Fig. 5), cabe destacar la presencia de bloques heterométricos desde la línea de costa hasta una profundidad de 6 m, con algún parche aislado de materiales más finos a la altura de los *escars* del flanco oriental de la cala. Entre los 6 m y los 10 m de profundidad se encuentra un acúmulo de materiales arenosos y gravas terrígenas. A partir de dicha cota, cubren el fondo aunque de manera fragmentada parches de *Posidonia oceanica*.

En el fondo de la ensenada se dispone una playa de cantos y bloques con una superficie aproximada de 850 m² y una anchura media de 15 m. La composición de la playa es heterométrica, con clastos que oscilan desde las arenas gruesas a los bloques de orden métrico. Todo ello resulta en una pendiente acusada, situándose las cotas de la playa en su contacto con el acantilado sedimentario o los afloramientos de roquedo triásico en los 3 m respecto el n.m.m.

En Cala Deià desagua el torrent Major, que con una cuenca de *ca.* 7 km² se caracteriza por lo acusado de su pendiente, ya que en los escasos 3,7 km lineales que separan Cala Deià del Puig des Teix se cubre un desnivel de 1.063 m. Buena parte de la cuenca se encuentra regularizada por bancales por lo que los procesos de erosión están bastante atenuados (Mateos et al., 2012), a lo que se une lo elevado de la artificialización del colector principal del torrent Major, donde abundan los sectores con secciones emparedadas e incluso algunas represas.

En Cala Deià existe un pequeño núcleo de población de edificios unifamiliares en el flanco occidental de la desembocadura del torrent Major -8 amarres- algunos de los cuales cuenta con *escars* en un estado de conservación óptimo y otros que están en ruinas, así como dos establecimientos de restauración.

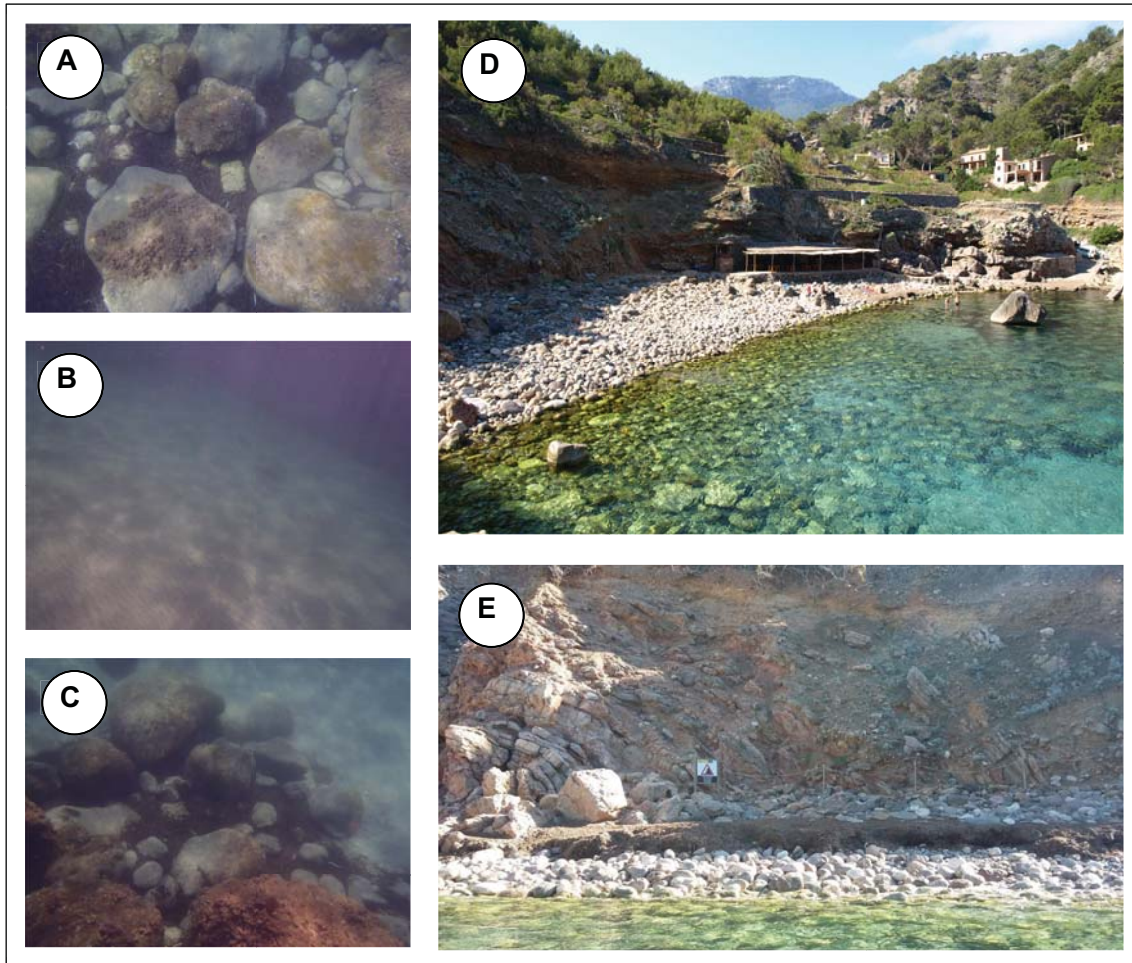


Fig. 5. Tipología de fondos de Cala Deià y playa de cantos y bloques. (A) Bloques de orden métrico al pie de los acantilados cercanos a cas Patró March (B) Fondos arenosos en el centro de la cala a profundidades 3 m. (C) Fondos de bloques y cantos con parches de arena entre 4 y 6 m de profundidad. (D) Vista general de la playa de bloques y cantos de Cala Deià; julio 2015. (E) Detalle de la playa de cantos con el acantilado sedimentario y la acumulación de bermas vegetales tras una tormenta en noviembre de 2015.

En cuanto al margo geológico y geomorfológico, en la ensenada afloran diferentes materiales rocosos de naturaleza diversa y con una compleja relación estructural entre si (Gelabert, 1998). Las litologías presentes de más antigua a más moderna son (Fig. 6):

- Calizas micríticas y dolomías laminadas de color gris oscuro, bien estratificadas y formando capas de 0,5 a 1,5 m de potencia. Corresponden al Muschelkalk (Triásico medio) y representan los materiales duros y competentes que construyen el paredón occidental de la cala.
- Limolitas y margas rojas con algunos niveles de dolomías y carniolas y localmente presencia de yesos. Son facies típicas del Keuper (Triásico superior) y aparecen en el centro de la cala, así como a lo largo del sector lineal que cubre desde es Còdols Blancs hasta es Gall. La fragilidad y naturaleza plástica de algunas de las capas de esta unidad explica el dinamismo de los acantilados de la zona y el gran número de movimientos en masa y deslizamientos que pueden apreciarse en el sector.

- Brechas calcáreas y dolomíticas de la base del Lías. Son los materiales resistentes que constituyen los principales relieves y escarpes que circundan la cala.
- Calcáreas con abundante microfauna y conglomerados con bloques del Lías y del Muschelkalk de edad Mioceno inferior. Están carstificados y constituyen el flanco oriental de la cala.
- Finalmente, cabe destacar el importante cuerpo de conglomerados con matriz limo-arcillosa que a modo de depósitos aluviales cuaternarios se disponen a lado y lado de la cala cubriendo tanto los materiales del Muschelkalk, los Triásicos y los del Mioceno Inferior.

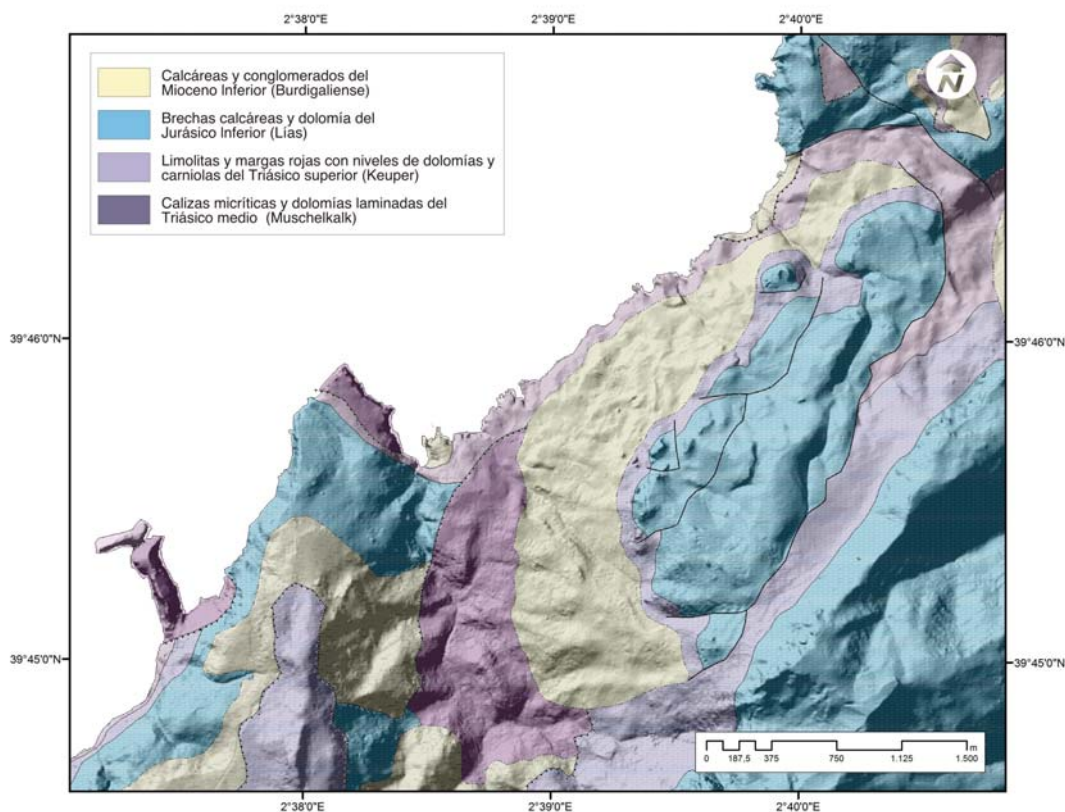


Fig. 6. Lito-estratigrafía de la zona de Cala Deià. Modificado de la capa de geología de la IDEIB (<http://ideib.caib.es>) y de Gelabert, (1999).

Desde un punto de vista geomorfológico, la ensenada de Cala Deià puede clasificarse como una playa encajada *-pocket beach-* y se corresponde con la inundación del tramo bajo del torrent Major por el ascenso del nivel del mar asociado al último interglacial.

El propio perfil batimétrico de la cala (Fig. 4) así como la batimetría (Fig. 3) sugieren que la cala responde a un antiguo cauce fluvial sobre el que encontramos depósitos de bloques de orden métrico y que a partir de la cota de -12 m se

expande en forma de abanico de bloques sumergido (fan delta) como los descritos por Rodríguez-Perea (1984) para los torrentes de Son Bunyola en el Port des Canonge (Banyalbufar).

El desarrollo del trazo de la cala se ve favorecido por la erosión diferencial sobre los materiales menos resistentes del Keuper y los aluviones cuaternarios. En relación al cuerpo de aluviones cuaternarios, Mateos (1998) identifica a las lluvias torrenciales por encima de los 140 l/h y la erosión marina como los principales mecanismos de desmantelamiento de los acantilados sedimentarios de Cala Deià.

5. Evolución histórica de la playa seca

5.1 Materiales y métodos

Se ha realizado un análisis de la evolución de la playa seca mediante la digitalización de la serie de fotografías aéreas existentes para la zona obtenidas de los servicios *web-map-service* (WMS) de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Illes Balears (IDEIB) y la colección de fotografía aérea del Departament de Ciències de la Terra de la Universitat de les Illes Balears. El conjunto de imágenes cubre el período de 1956 a 2015 e integra 13 vuelos fotográficos (Tabla 1).

Las fotografías aéreas se han digitalizado a 600 ppp y guardado en formato TIFF (24-bit *Tagged Image File Format*), puesto que este descompone la imagen en una malla de píxeles de igual tamaño y con información del nivel de densidad de cada píxel en tres bandas de colores (rojo, verde y azul), mostrando 256 niveles de contraste para cada una de las bandas.

Para comparar cuantitativamente las fotografías y la obtención de la posición de la línea de costa, así como de la superficie de playa seca, se precisa de su georreferenciación. Ésta se ha realizado mediante la herramienta *Georeferencing* del software ArcGIS 10.0 que permite establecer un mínimo de 20 vectores por imagen que unen localizaciones en la imagen deformada respecto de las mismas posiciones en la ortofotografía de referencia del IDEIB (2012). El error asociado a la rectificación geométrica dependen de la escala de la fotografía aérea, las condiciones de vuelo y de la resolución del escaneo (Tabla 1).

Fecha	Escala	GPD	Tipología - Fuente
1956 - julio	50 cm píxel	-	Ortofoto BW, SITIBSA
1973 - marzo	1 / 15.000	0.64	BW - Colección UIB - Georeferenciación SOCIB
1979 - junio	1 / 18.000	0.79	BW - Colección UIB - Georeferenciación SOCIB
1981 - junio	1 / 20.000	0.64	BW - Colección UIB - Georeferenciación SOCIB
1983 - julio	1 / 12.000	0.72	RGB- Colección UIB - Georeferenciación SOCIB
1989 - junio	1 / 20.000	-	Ortofoto RGB - SITIBSA
1997 - marzo	1 / 20.000	0.79	RGB- Colección UIB - Georeferenciación SOCIB
2002 - julio	45 cm píxel	-	Ortofoto RGB - SITIBSA
2006 - julio	50 cm píxel	-	Ortofoto RGB, PNOA - SITIBSA
2008 - julio	25 cm píxel	-	Ortofoto RGB - SITIBSA
2010 - junio	25 cm píxel	-	Ortofoto RGB - SITIBSA
2012 - julio	25 cm píxel	-	Ortofoto RGB - SITIBSA
2015 - marzo	25 cm píxel	-	Ortofoto RGB - SITIBSA

Tabla 1. Fotografía aérea y ortofotografía utilizada para el estudio histórico de la playa seca.

Una vez rectificadas las fotografías, se ha procedido a digitalizar la línea de costa. El concepto de línea de costa es un constructo de difícil traslación en un medio tan dinámico como es la costa y que depende de múltiples factores como son la marea astronómica o la pendiente de la playa entre otros (Ojeda, 2000; Boak y Turner, 2005). Así las cosas, dadas las condiciones micromareales del Mediterráneo occidental y que se dispone una serie temporal lo suficientemente larga, se ha adoptado como criterio para la identificación de la línea de costa, el contacto entre la lámina de agua y la playa seca (Figura 7).

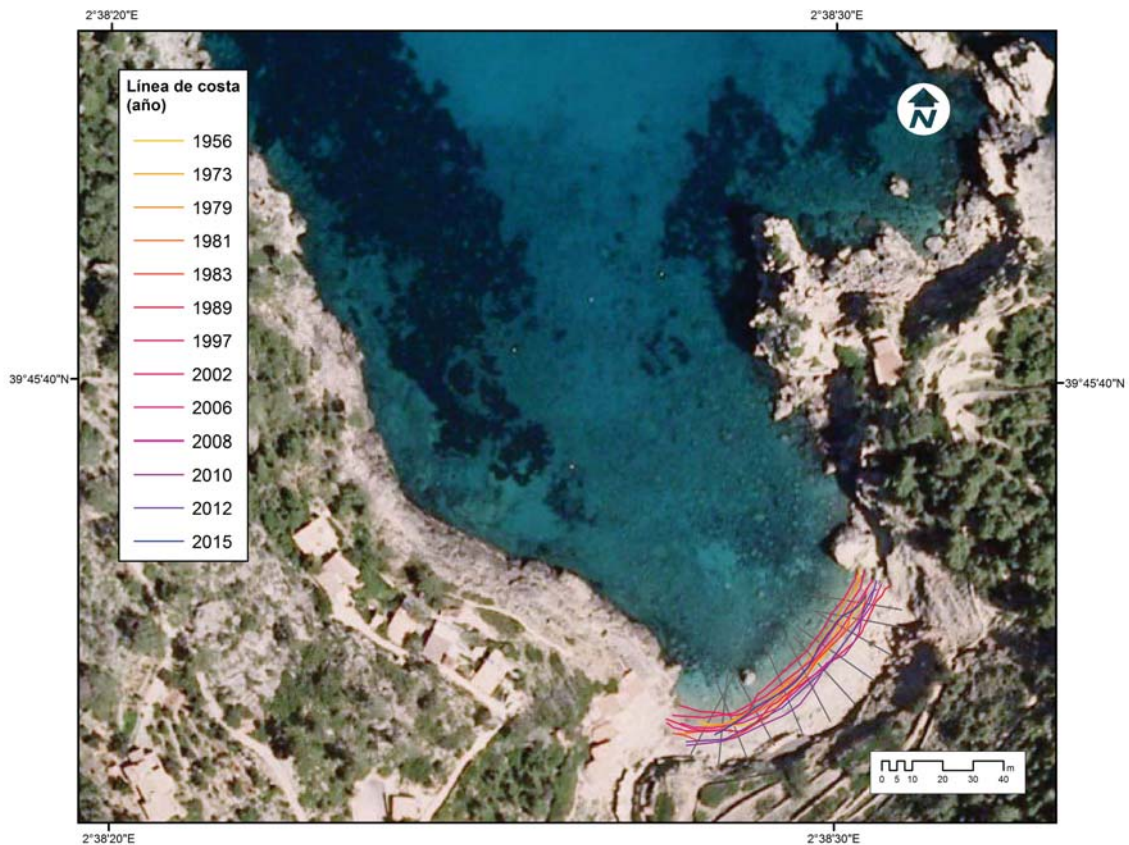


Fig. 7. Líneas de costa de Cala Deià para el periodo 1956–2015

A continuación se utilizó la herramienta *Digital Shoreline Analysis, DSAS* (Thieler et al., 2004) del *United States Geological Survey* (USGS) con la que se han obtenido diferentes indicadores como son la superficie de la playa o la anchura de la playa y la tendencia lineal de erosión-acreción (LRR, Linear-Regression Rate) calculadas en transectos trazados cada 10 m a lo largo playa.

A grandes rasgos la aplicación DSAS mide para un transecto específico la distancia de la línea de costa para una fecha determinada respecto de un punto conocido. Repitiéndose la misma operación para diferentes fechas y diferentes transectos se obtiene una serie temporal de distancias de la línea de costa a un punto conocido. A partir de dicha variable pueden obtenerse diferentes indicadores. Para el presente estudio se ha considerado la tendencia lineal de erosión (LRR, *linear-regression rate of change*). Se obtiene a partir de una regresión lineal por mínimos cuadrados de todas las posiciones de la línea de costa para un transecto en particular. La tasa o tendencia lineal de erosión se corresponde con la pendiente de la línea de regresión. Éste método, respecto de otros, tiene la ventaja de atenuar el efecto de *outliers* –posiciones de la línea de costa debidos a forzamientos extremos previos a la obtención de la fotografía aérea– y no sobrestimar las tasas de cambio que puedan resultar de comparar las posiciones de línea de costa más antiguas o más modernas, o la posición de la más erosiva respecto de la más transgresiva (Dolan et al., 2001; Genz et al., 2007).

5.2 Resultados

Para el estudio de la evolución histórica de la playa seca entre 1956 y 2015 contamos con 13 fotografías aéreas, lo que representa una observación aproximadamente cada 5 años. La figura 7 presenta la disposición de las líneas de costa para los 59 años caracterizados. Puede apreciarse una gran variabilidad de la línea de costa durante el periodo de estudio, lo que supone por término medio un cambio de la posición entre la línea de costa más cercana al pie del acantilado y la más lejana de $10,2 \pm 1,6$ m, con máximos de 12,2 m y mínimos de 7,7 m.

La digitalización de la línea de costa y del límite posterior de playa a partir de la fotografía aérea arroja, para el periodo 1956 – 2015, una superficie media de la playa de $1.314,4 \pm 239,6$ m² y una anchura media de $14,7 \pm 2,8$ m. No obstante, la serie temporal relativa a la superficie y anchura de la playa (Fig. 8) pone de manifiesto diferentes fases evolutivas de la playa.

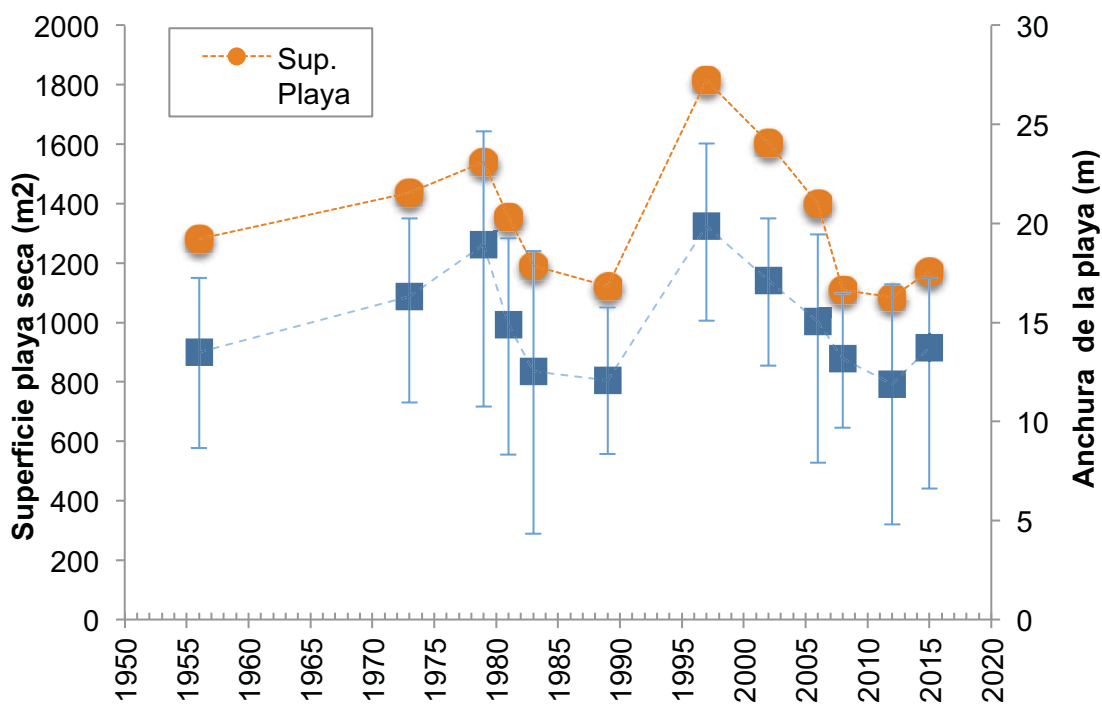


Fig. 8. Evolución de la superficie de playa seca y de la anchura media de la cala Deià, 1956–2015

Así, entre 1956 y 1979 en base a la fotografía disponible, se observa un incremento tanto de la superficie de la playa como de su ancho, incrementándose la superficie en 259 m² y el ancho medio de la playa en 2,8 m. Durante la década de los ochenta la playa seca experimenta un retroceso respecto de 1979; la superficie se reduce en 418,3 m² y el ancho medio de la playa retranquea alrededor de 5,5 m. Es en este periodo cuando se registra uno de los dos temporales más energéticos en la zona. Concretamente en diciembre de 1980 (vid. Sección 6). Durante la década de los noventa se producen acciones de gestión en la playa en forma de vertidos de



Fig. 9. Detalle de la extensión y características de la playa seca de cala Deià en 1998, 2002 y 2015.

sedimentos gruesos y medios (*com. pers.* Ayuntamiento de Deià) en el torrent Major que acaban alimentando la playa y que resultan en 1997 en una playa seca con la mayor superficie (1814,7 m²) y ancho medio (20 m) de los últimos 59 años de historia de la cala. De 1997 a 2010 la playa perdió 833,9 m² y su anchura media se redujo en 9,5 m. En dicho periodo, en noviembre de 2001, sufrió uno de los temporales más severos en intensidad y persistencia recogidos en la serie de datos de oleaje disponible desde 1953. Finalmente para el periodo 2010-2015 se observa una leve recuperación de la playa en la que su superficie incrementa en 190 m² y su anchura media en 2.1 m desde los mínimos de 2010 (Tabla 2). Actualmente la playa presenta una superficie similar a la que alcanzaba en la década de los 80 o ligeramente inferiores a las del primer hito fotográfico del que parte el presente estudio, aunque es evidente la pérdida de sedimentos de calibres medios y finos (Fig. 9).

Año	Superficie (m ²)	Anchura de la playa (m)			Variación sup. (m ²)	Var. sup. acumulada (m ²)
		media	min	max		
1956	1281.03	14.81	9.98	18.57	-	-
1973	1436.81	15.96	10.62	19.91	155.78	155.78
1979	1540.05	17.62	9.43	23.34	103.24	259.02
1981	1353.65	15.30	8.74	19.66	-186.4	72.62
1983	1191.6	13.05	4.84	19.12	-162.05	-89.43
1989	1121.75	12.13	8.42	15.83	-69.85	-159.28
1997	1814.73	20.06	15.29	24.25	692.98	533.7
2002	1603.64	18.09	13.79	21.23	-211.09	322.61
2006	1399.09	15.44	8.30	19.82	-204.55	118.06
2008	1108.52	13.08	9.58	16.37	-290.57	-172.51
2010	980.81	10.52	3.43	15.56	-127.71	-300.22
2012	1084.67	11.80	4.68	15.31	103.86	-196.36
2015	1170.82	12.65	2.00	16.36	86.15	-110.21

Tabla 2. Superficie y anchura media de cala Deià y variación de la superficie de playa seca.

Partiendo de las líneas de costa y atendiendo a la serie temporal de oleaje (vid. Sección 6) se ha procedido a calcular las tasas o tendencias de cambio de la línea de costa mediante el parámetro (LRR, *linear-regression rate of change*). Partiendo de los hitos de los eventos extremos de diciembre de 1980 y noviembre de 2001, se ha calculado la tendencia de evolución de la playa para los periodos 1956–1981, 1981–1997 y 2002–2015.

En el primero de los casos (Fig. 10), para el intervalo 1956-1981, las tasas de cambio de la línea de costa son positivas aunque bajas, lo que indica un escenario de estabilidad, tan sólo destacan algunos puntos con avances entorno 12 cm/año en el flanco oriental de la cala y tras sa Peña, mientras que hay un leve retroceso, también entorno a los 12 cm/año cercanos a la desembocadura del torrente.

Las tasas de acumulación son mayores y también generalizadas para el conjunto de la playa en el ejercicio 1981–1997. La playa avanza en promedio entre 25 y 50 cm/año, dándose una mayor acumulación en la desembocadura del torrente, con valores entre 50 y 75 cm/año (Fig. 11).

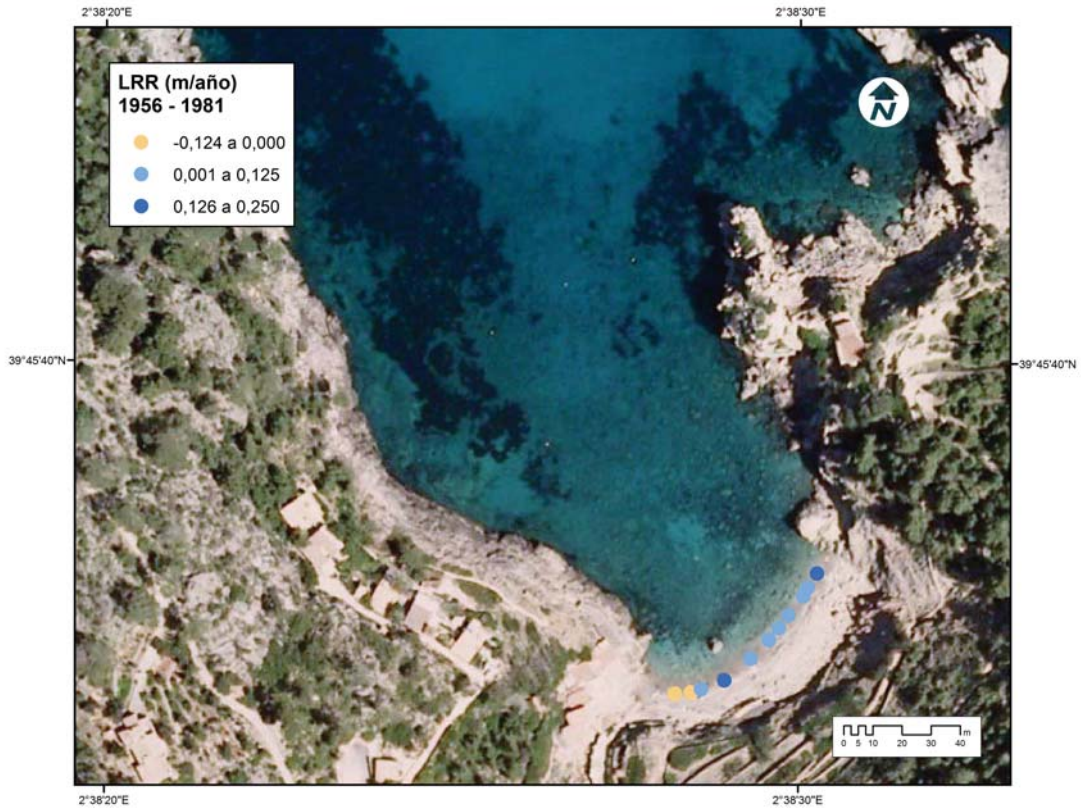


Fig. 10. Tasas de cambio de la línea de costa de cala Deià, 1956–1981.



Fig. 11. Tasas de cambio de la línea de costa de cala Deià, 1981-1997.

Finalmente, el periodo 2002-2015 se caracteriza por un retroceso generalizado de la playa entre 12 y 50 cm/año, siendo tanto más acusado en el sector occidental de la cala donde los valores se ubican alrededor de 50 cm/año y en los transeptos más cercanos a la desembocadura alcanza retrocesos de 75 cm/año (Fig. 12).



Fig. 12. Tasas de cambio de la línea de costa de cala Deià, 2002-2015.

6. Caracterización del oleaje durante el período de estudio.

En el marco del Estudio de caracterización de Cala Deià, se fondeó un perfilador acústico-doppler AWAC de 600 kHz a una profundidad de 18 metros en la posición 39° 45.865N, 2° 38.406'E sobre un fondo arenoso. El perfilador se instaló el 17 de junio de 2015 y estuvo midiendo de forma ininterrumpida hasta su recuperación el 17 de Noviembre de 2015.

La frecuencia de muestreo programada fue de 2 Hz midiendo la altura, dirección y período de oleaje dentro de la bahía y proporcionando un dato estadístico para cada una de las magnitudes de forma horaria. Si bien el período de estudio no permite obtener conclusiones estadísticamente significativas, es útil para mostrar las características interanuales de la zona de estudio.

Las figuras 13, 14 y 15 muestran las observaciones del oleaje para el período durante el cual estuvo fondeado el perfilador doppler (altura de ola significativa y dirección en el panel superior, período de pico en el segundo panel, velocidad en el fondo normalizada en el tercer panel y tensión en el fondo normalizada en el panel inferior). El período se ha dividido en tres partes para una mejor visualización (del 17 de junio al 7 de agosto en la Fig. 13; del 7 de agosto al 27 de septiembre en la Fig. 14 y del 27 de septiembre al 17 de noviembre en la Fig. 15).

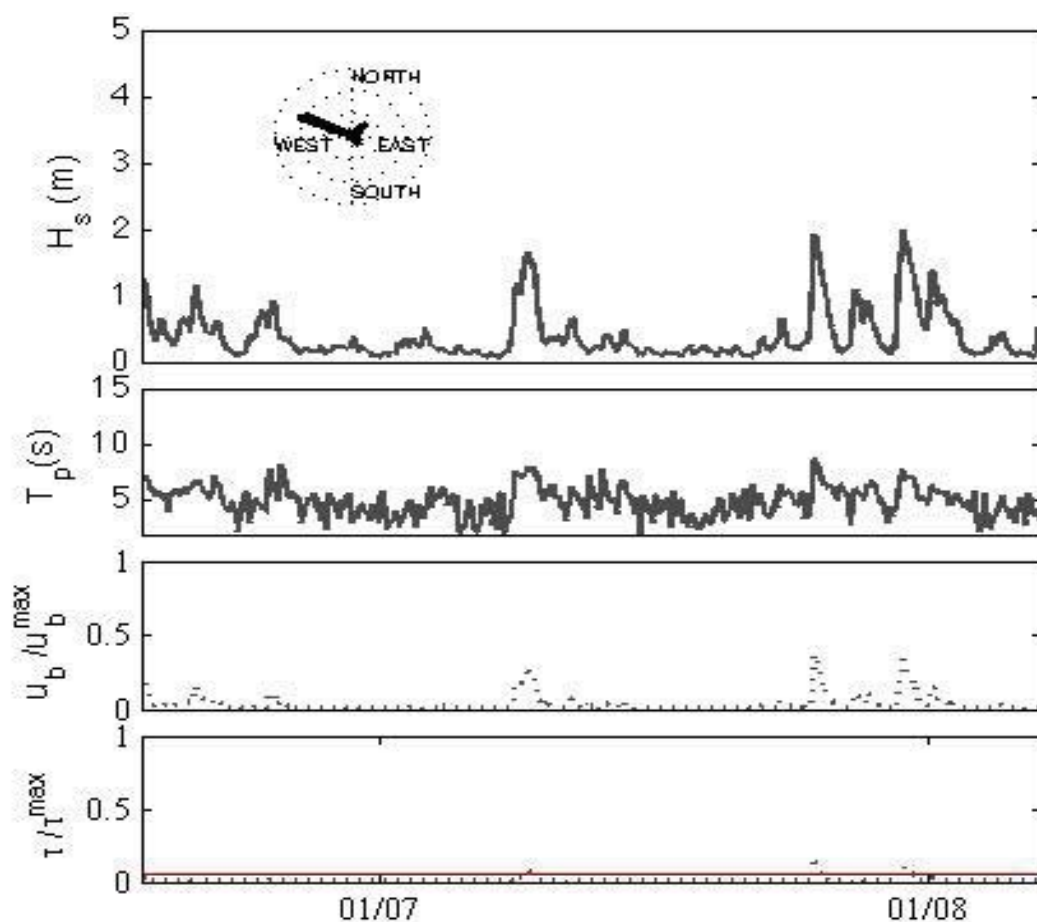


Fig. 13. (a) Altura de ola significativa (m); (b) período de pico; (c) velocidad en el fondo (normalizada) y (d) tensión en el fondo (normalizada) para el período entre el 17 de junio y el 7 de agosto de 2015.

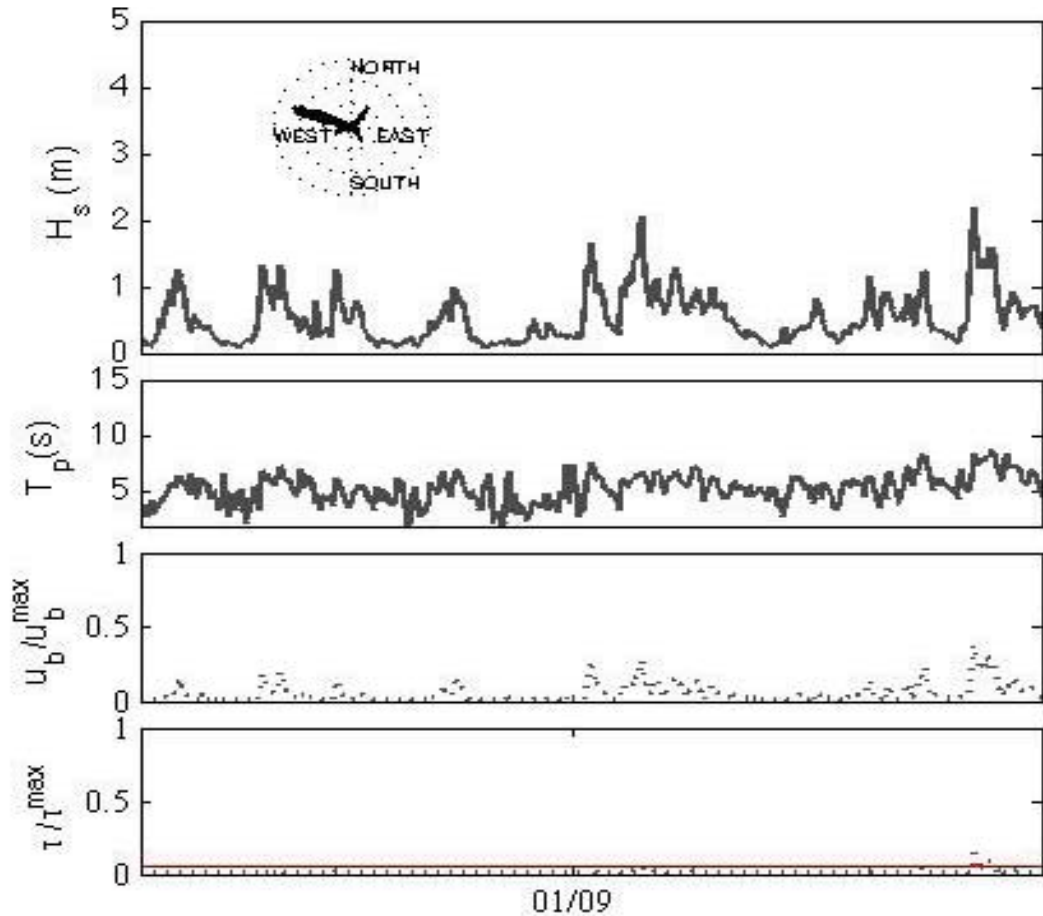


Fig. 14. (a) Altura de ola significativa (m); (b) período de pico; (c) velocidad en el fondo (normalizada) y (d) tensión en el fondo (normalizada) para el período entre el 7 de agosto y el 27 de septiembre de 2015.

Durante el período estival (de junio a mediados de septiembre) las condiciones de oleaje dentro de la cala son de suaves a moderadas con alturas de ola medias correspondientes al primer y segundo período de $H_s=0,37\text{m}$ y $H_s=0,52\text{m}$ (medianas de $0,23\text{m}$ y $0,41\text{m}$ respectivamente). La máxima altura de ola registrada durante el primer período fue de $H_s=1,9\text{m}$ el 30/07/2015 y durante el segundo período de $H_s=2,2\text{m}$ el 23/09/2015. Los períodos de pico correspondientes a estas alturas fueron de $T_p=7,7\text{s}$ y $T_p=7,9\text{s}$ respectivamente. La dirección predominante del oleaje durante estos dos períodos fue del NW.

En el tercer período y como consecuencia de los temporales del Norte generados en el Golfo de León, las condiciones del oleaje cambian produciéndose un incremento de energía del oleaje. Para el tercer período, la altura media de ola es $H_s=0,63\text{m}$ (mediana de $0,44\text{m}$) registrándose dos eventos con alturas de ola significativas mayores de 3m , el primero de 10 horas de duración a partir del 30/09/2015 a las 18:00 y el segundo de 12 horas de duración a partir del 21/10/2015 a las 03:00 h. La altura máxima registrada durante este tercer período fue de $H_s=4,8\text{m}$ el 30/09/2015 a las 22:00 h con un período de pico asociado de $T_p=9,8\text{s}$.

En las Figuras 13, 14 y 15 se muestra en el tercer panel la velocidad (normalizada por la máxima registrada) en el fondo asociada a los registros que es la responsable del movimiento del sedimento y el esfuerzo asociado a la misma (normalizado por la máxima) en el último panel, juntamente con el esfuerzo crítico a partir del cual hay transporte de sedimento. Para el cálculo del esfuerzo crítico se ha tomado un tamaño de sedimento muy grueso ($d_{50}=200\text{mm}$). Tal y como se puede observar, es durante los mayores temporales del Norte cuando se moviliza la mayor parte de sedimento en el fondo y debido a la componente hacia mar abierto de la velocidad en el fondo el sedimento se transporta hacia aguas profundas.

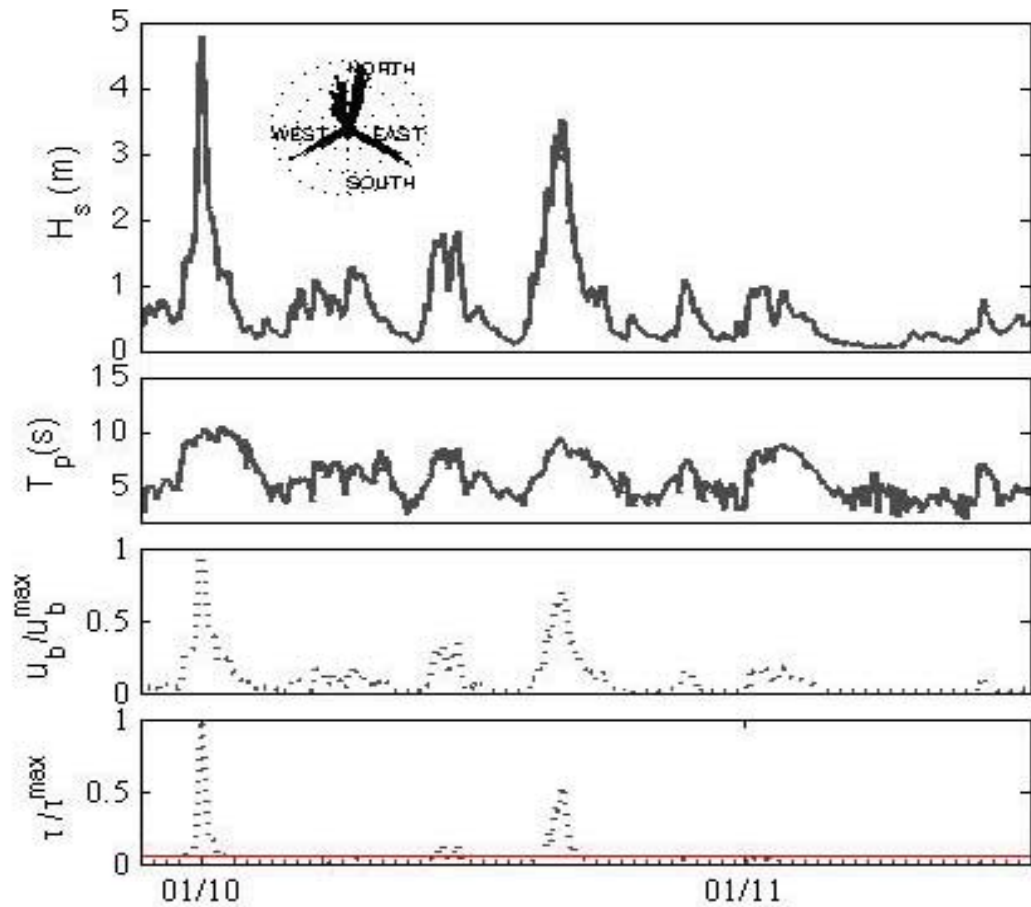


Fig. 15. (a) Altura de ola significante (m); (b) período de pico; (c) velocidad en el fondo (normalizada) y (d) tensión en el fondo (normalizada) para el período entre el 27 de septiembre y el 17 de noviembre de 2015.

7. Caracterización del régimen medio

La información sobre el clima marítimo en la zona de estudio se ha obtenido a partir de la base de datos SIMAR44 de Puertos del Estado para un punto en aguas profundas frente a la zona de estudio. En particular se han analizado 10 años de datos horarios de altura de ola (H_s), período de pico (T_p) y dirección de oleaje para el punto SIMAR 2115117 a (2.58E, 39.75N) en aguas profundas (60 metros).

La configuración fisiográfica de Cala Deià, abierta al Norte, la deja expuesta a los temporales con direcciones entre el W y el NNE estando protegida de los oleajes del tercer cuadrante (S-W) y totalmente a los del segundo cuadrante (E-S) (Fig. 16).

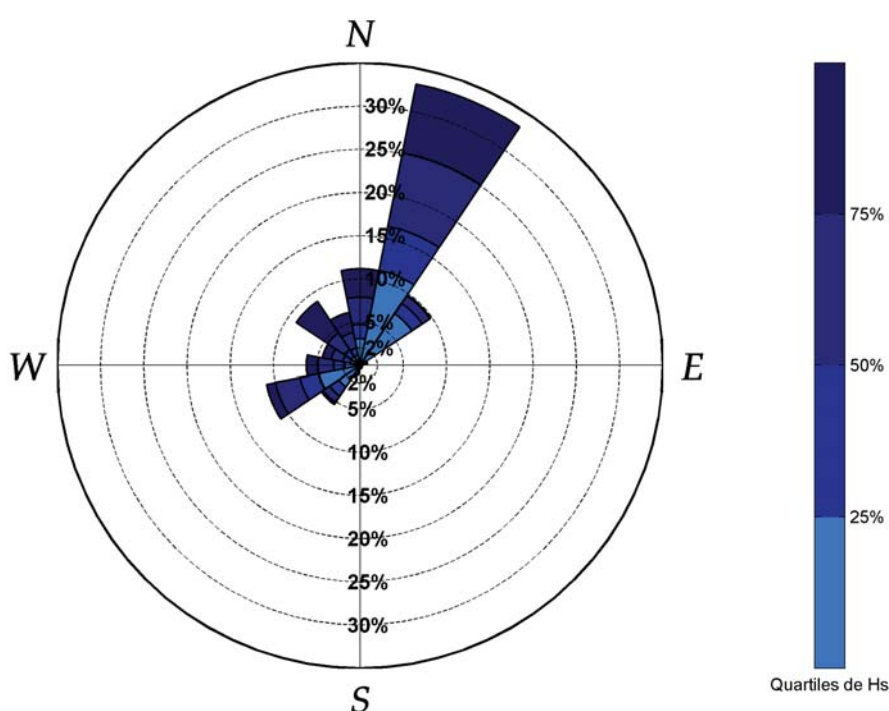


Fig. 16. Dirección y cuartil de altura de ola significativa en aguas profundas.

En aguas profundas se registra un 17% de episodios de calma ($H_s < 0.3$ m). Los oleajes del W al NNE suman el 70% de los eventos registrados siendo éstos los que mayor efecto tienen en la cala. La altura media para las direcciones del W son de 0,6 m siendo las mayores las de componente NW con 1 m de altura significativa para todo el período analizado (Tabla 3).

En cuanto a la altura de diseño H_{s12} (aquella que sólo es superada 12 horas al año) se observa que las mayores alturas de ola se obtienen con direcciones de oleaje del N y del NW con 4,20m y 5,10m de altura de ola respectivamente.

Los registros proporcionados por Puertos del Estado en aguas profundas se han propagado hasta la zona de estudio mediante un modelo espectral de oleaje que resuelve las ecuaciones de la pendiente suave con la aproximación parabólica. Las

batimetrías han sido obtenidas en aguas profundas a partir de la información digitalizada de las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina y en aguas someras a partir de la batimetría de detalle obtenida en el marco del proyecto una ecosonda de barrido lateral (ver Anexo 1).

A partir de los datos propagados, se obtiene que dentro de la Cala los mayores valores para la H_{s12} coinciden con las direcciones del N y del NNW con 3,69m y 4,03m respectivamente siendo también las direcciones del NW elevadas con un valor de 3.38m (Tabla 3 entre paréntesis). Estas direcciones son las que potencialmente generarían más problemas modificando un perfil de equilibrio.

Dirección	Probabilidad	$H_{s50\%}$ (m)	$H_{s90\%}$ (m)	$H_{s99\%}$ (m)	H_{s12} (m)
N	0,111	0,70(0,72)	1,80(1,67)	3,30(2,90)	4,20(3,69)
NNE	0,332	0,60(0,29)	1,70(0,62)	3,10(1,04)	4,10(1,42)
NE	0,098	0,20(0,16)	0,60(0,34)	1,00(0,57)	1,40(0,63)
ENE	0,001	0,30(0,13)	0,60(0,25)	0,90(0,34)	1,00(0,37)
E	0,003	0,40(0,04)	0,70(0,04)	0,90(0,04)	0,90(0,04)
ESE	0,002	0,40(0,00)	0,70(0,00)	1,00(0,00)	1,00(0,00)
SE	0,003	0,40(0,00)	0,60(0,00)	0,80(0,00)	0,80(0,00)
SSE	0,004	0,40(0,00)	0,50(0,00)	0,70(0,00)	0,70(0,00)
S	0,004	0,30(0,00)	0,60(0,00)	0,80(0,00)	0,80(0,00)
SSW	0,012	0,30(0,00)	0,60(0,00)	0,70(0,00)	0,80(0,00)
SW	0,054	0,30(0,00)	0,70(0,00)	1,60(0,00)	2,02(0,00)
WSW	0,110	0,40(0,01)	1,00(0,01)	2,00(0,01)	2,60(0,01)
W	0,062	0,60(0,11)	1,50(0,19)	2,70(0,28)	3,67(0,37)
WNW	0,044	0,60(0,26)	1,62(0,61)	2,90(0,96)	3,80(1,39)
NW	0,089	1,00(0,71)	2,70(1,67)	4,20(2,73)	5,10(3,38)
NNW	0,062	0,80(0,90)	2,00(2,11)	3,60(3,45)	4,06(4,03)

Tabla 3. Estadísticos de oleaje en el punto de análisis. Entre paréntesis se muestran las alturas correspondientes a la propagación numérica hacia la Cala en un punto a 11 metros de profundidad.

8. Caracterización del régimen extremal

Para la caracterización del régimen extremal se ha utilizado el punto 2117120 de la base de datos SIMAR44 de Puertos del Estado con para un punto en aguas profundas (>600 m) en la posición (2.75°E, 40.00°N) que consiste en 57 años de datos cada tres horas de altura significativa de ola (H_s), período de pico (T_p) y dirección de oleaje.

La Fig. 17 muestra la altura de ola significativa (la dirección predominante) así como el período de pico para el punto analizado y el período entre enero de 1958 y septiembre de 2015. En este período destacan dos temporales con alturas de ola significativa superiores a los 10m el primero a partir del 28 de diciembre de 1980 con alturas de ola superiores a los 9 m durante 21 horas y dirección del Noreste y el segundo a partir del 10 de Noviembre 2001 con alturas de ola superiores a 9 m durante 5 días de dirección Norte.

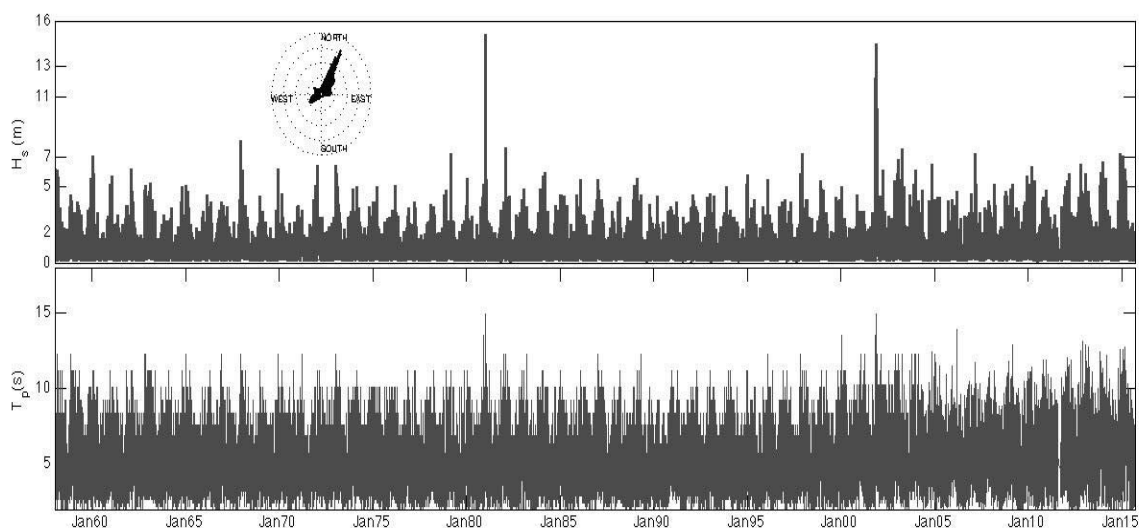


Fig. 17. Altura de ola significativa, dirección y período de pico para el punto SIMAR 2117120.

El régimen extremal determina que el periodo de retorno de 2 años está asociado a una ola de $H_s=6,1\text{m}$ en aguas profundas. Este tipo de temporal se produce fundamentalmente durante el otoño hasta el mes de marzo. La altura de ola asociada al período de retorno de 5 años es de $H_s=7,5\text{m}$ mientras que para un período de retorno de 10 años la altura significativa está entre los 8 y 9 metros. La Fig. 18 muestra la distribución de H_s en función del período de retorno para excedencias sobre un umbral de 4,3m de altura de ola significativa en aguas profundas.

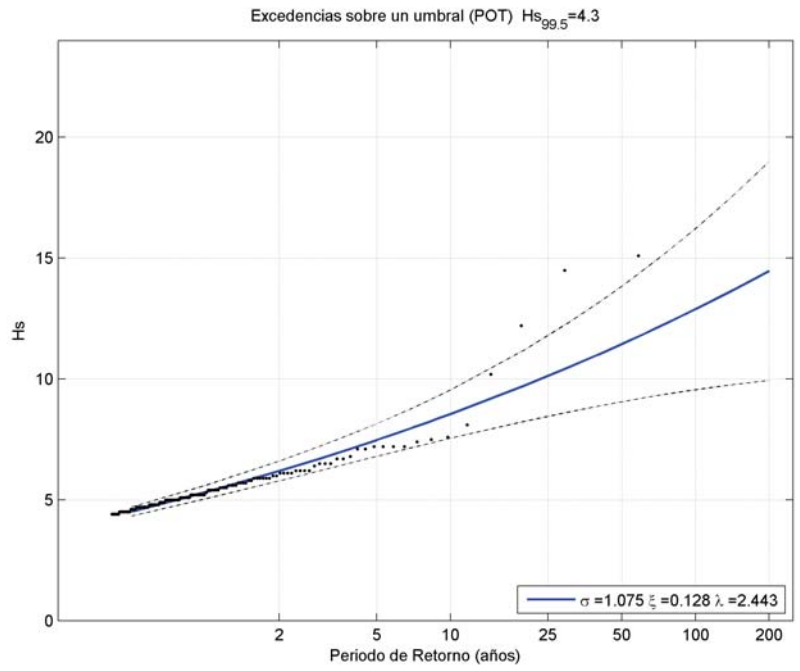


Fig. 18. Distribución de altura de ola en función del Período de retorno para el punto SIMAR 2117120

9. Simulaciones numéricas de oleaje.

Con el fin de realizar el modelo morfodinámico de Cala Deià, los diferentes escenarios de régimen medio y extremal se han propagado hacia la zona de interés mediante el modelo numérico SMC implementado por el GIOC de la Universidad de Cantabria. El modelo resuelve las ecuaciones de propagación bajo la hipótesis de la pendiente suave y con la aproximación parabólica. La malla de cálculo cubre la Cala con una resolución de 20 metros y en mar abierto y hasta el punto SIMAR que proporciona los datos de entrada con una malla de 120 metros.

La propagación para el régimen medio correspondiente a una ola de altura significativa de $H_s=0,49\text{m}$ con un período de $T_p=6\text{s}$ y una dirección de 22° (NNE) se muestra en la Fig. 19.

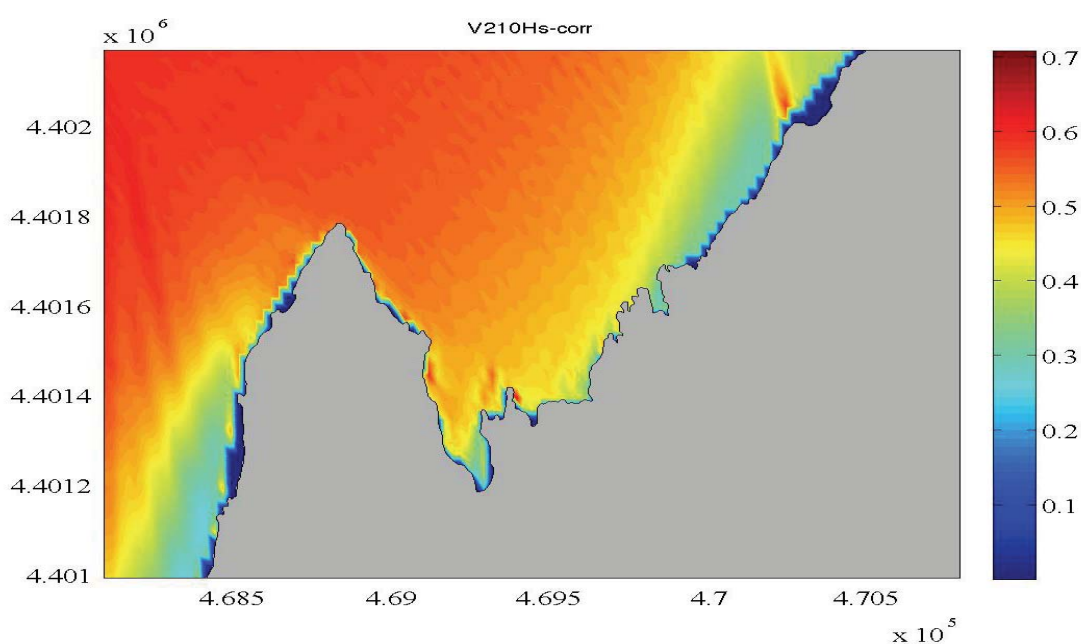
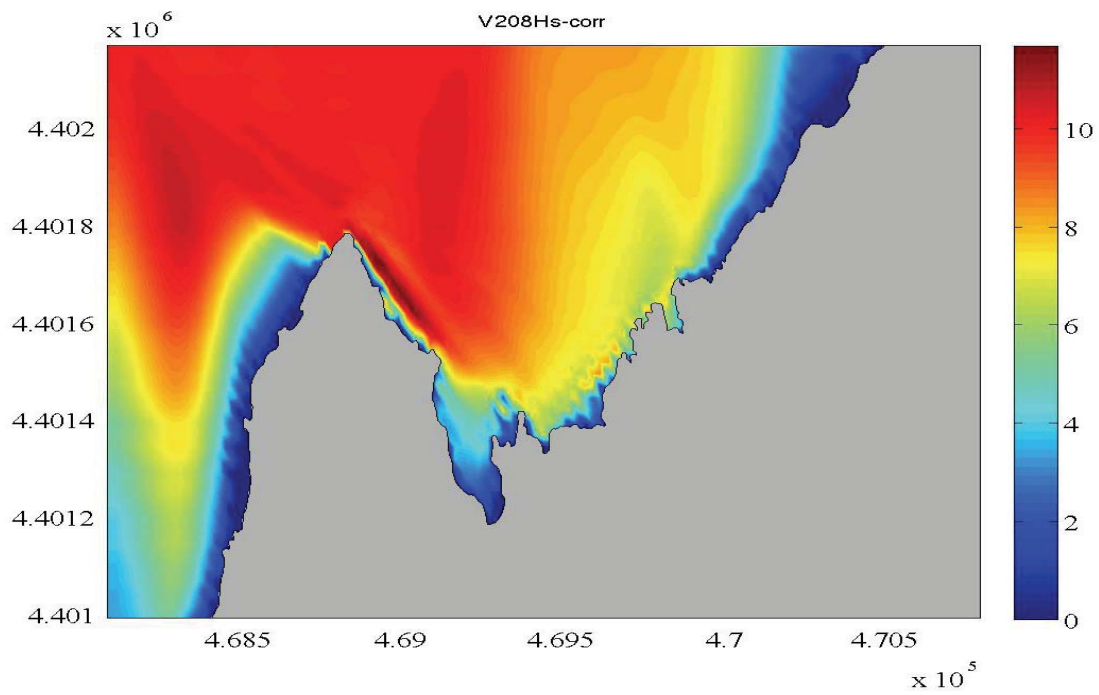


Fig. 19. Propagación para las condiciones medias hasta la zona de estudio.

Bajo estas condiciones, dentro de la Cala, la altura de ola no sobrepasa los $0,45\text{m}$ de altura significativa en la zona más profunda dentro de la Cala ($h=+6\text{m}$) siendo disipada en gran medida en profundidades bajas ($h<6\text{m}$) donde las alturas de ola son inferiores a los $0,3\text{m}$. Teniendo en cuenta el tamaño de sedimento encontrado en la zona, estas condiciones solo son capaces de movilizar aquellos sedimentos finos o muy finos que son marginales en toda la zona de estudio.

Las condiciones correspondientes al temporal de Diciembre de 1980 se muestran en la Fig. 20. En este caso, la ola propagada corresponde a $H_s=14\text{m}$ con un período $T_p=14\text{s}$ y una dirección de 20° (NNE).

En estas condiciones, en la zona de la cala entorno a los 6m de profundidad, las alturas de ola alcanzan los 4 metros superando los 3 metros en las zonas mas someras de la misma. Estas condiciones tienen la capacidad de movilizar gran parte del sedimento (fundamentalmente las arenas gruesas y las gravas) y en gran medida y debido a la componente offshore hacia aguas profundas.



El caso propagado correspondiente a Noviembre de 2001 (no se muestra) proporciona resultados similares al mostrado en la Fig. 20 (nótese que aunque la altura de ola fue menor, la dirección de incidencia era norte por lo que la Cala estaba totalmente orientada a dicho temporal).

10. Caracterización del sedimento

10.1 Materiales y métodos

Para la caracterización del sedimento de Cala Deià se han desarrollado dos aproximaciones diferentes. En primer lugar se ha realizado un muestreo del sedimento sumergido a diferentes profundidades atendiendo a los resultados de la batimetría y de la exploración *de visu* desde la embarcación realizada durante las primeras jornadas de trabajo de campo en la cala. En segundo lugar se ha procedido a la caracterización del sedimento de la playa emergida. Atendiendo a la dimensiones de éste último se ha procedido a su análisis de dimensiones y forma (morfoscopia) con el objeto de determinar si se trata de bloques y cantos aportados por el mar o bien por el desmantelamiento del acantilado sedimentario.

En cuanto al sedimento del sector sumergido de la cala se ha recolectado mediante catas directas realizadas por buzos, tomando del orden de 1,5 a 2 kg de sedimento a diferentes profundidades y en las zonas donde dominaba el sedimento arenoso (Fig. 21).



Fig. 21. Localización de los puntos de muestreo de sedimento en Cala Deià.

Una vez en el laboratorio las muestras se han limpiado con agua destilada para eliminar las sales y han sido atacadas con H_2O_2 para eliminar la materia orgánica durante un mínimo de 24h. A continuación se han secado a $105^{\circ}C$ durante otras 24 horas más para finalmente separar las muestras mediante tamizado en seco

durante 15 minutos a través de una torre con tamices con luz de malla de 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 i 0,063 mm. Las muestras con abundante fracción de sedimento inferior a 2 mm han sido analizadas mediante granulómetro láser. Los resultados del tamizado en seco o la combinación de tamizado en seco – granulómetro láser, una vez normalizados los valores han servido para calcular los parámetros granulométricos y clasificación del sedimento mediante el software Gradistat (Blott y Pye, 2001).

Para la caracterización del sedimento grueso de la playa emergida se ha procedido al muestreo de 8 puntos distribuidos representativamente sobre la playa seca y que se distribuyen en tres transeptos comprendiendo la zona más cercana a la línea de costa, la más alejada y una zona intermedia (Fig. 22). En cada uno de dichos puntos se han medido 50 bloques-cantos, de los que se han tomado las dimensiones de eje máximo, eje medio y eje mínimos, así como se ha consignado la naturaleza, formación y edad geológica del bloque y mediante una escala semicuantitativa la forma y rugosidad del sedimento siguiendo las aproximaciones metodológicas de Benn (1994) y Gómez-Pujol (1999).

10.2 Caracterización del sedimento de la playa sumergida

Como ya se ha puesto de manifiesto en el apartado introductorio la batimetría de la Cala Deià se caracteriza por un fondo irregular y rugoso en el que dominan campos de bloques heterométricos, habitualmente de dimensiones de orden



Fig. 22. Puntos de muestreo para la caracterización morfoscópica de bloques.

métrico y de forma dispersa parches de sedimentos gruesos (gravas y arena gruesas).

Como puede apreciarse en la Fig. 23 en la zona más externa de la cala y sus proximidades (s'Encolla, caleta de Son Beltran) pueden identificarse tres prismas de arena que se superponen al basamento de la zona. Nos encontramos en estas posiciones con arenas medias bien clasificadas (Tabla 4) que tienden a sedimentos más gruesos –arenas gruesas y en algunos casos con una presencia de gravas finas o arenas muy gruesas– frente a s'Encolla y la caleta de Son Beltran. En su conjunto se trata de arenas terrígenas con abundantes granos de color grisáceo procedentes de la erosión de los acantilados jurásicos y triásicos o del aporte del torrent Major. En cualquier caso, siguiendo a Jaume y Fornós (1992), la proporción de granos de arena de origen biogénico para el sedimento de la zona es relativamente bajo (< 10%).

Dentro de la cala pueden apreciarse otros tres parches de sedimento fino entre los campos de bloques. El primero, que corresponde con la muestra CD04, se caracteriza por un textura de gravas finas. En el segundo, ya cercano a la línea de costa al este de sa Penya, hay un parche donde abundan las arenas medias bien clasificadas y, finalmente, a la altura de la cova des Vell Marí, al pie del flanco occidental de la cala, se encuentra un parche de sedimentos más gruesos donde se combinan gravas finas y arenas gruesas. El calibre más grueso corresponde – CD06– con la zona donde se dan mayores altura de ola en el interior de cala (vid. Fig. 20).

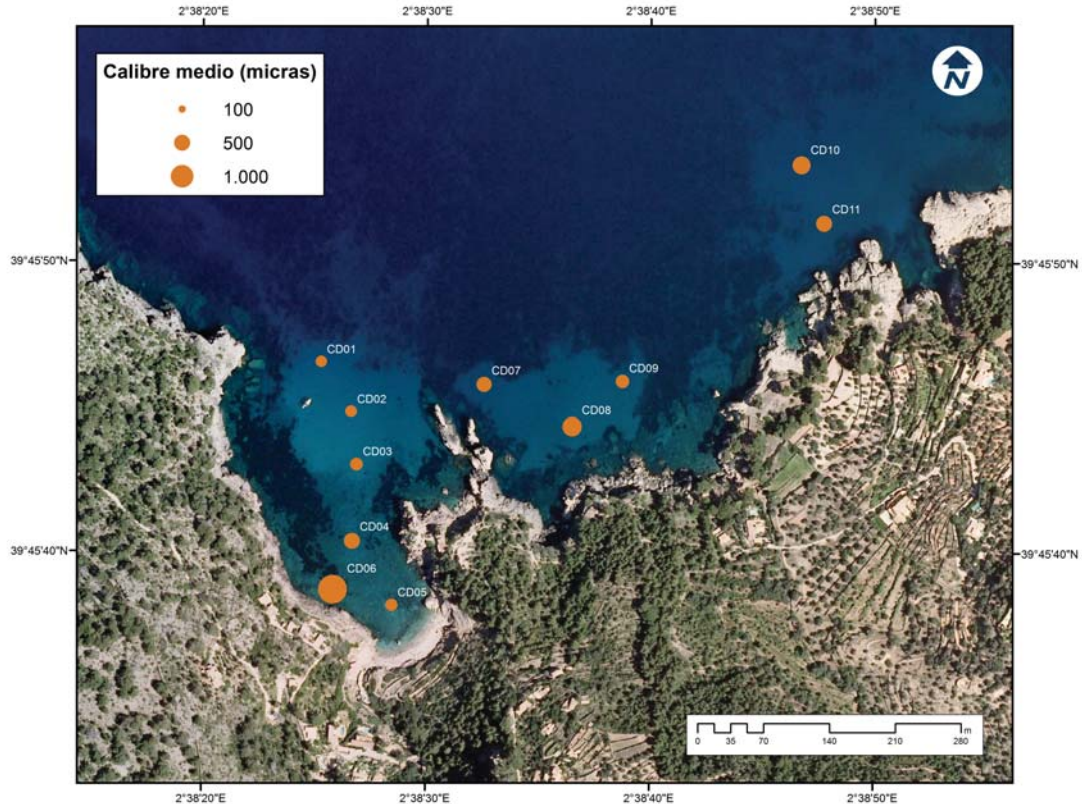


Fig. 23. Calibre medio (micras) de los sedimentos de Cala Deià.

	CD01	CD02	CD03	CD04	CD05	CD06	CD07	CD08	CD09	CD10	CD11
Sector	DEIA	DEIA	DEIA	DEIA	DEIA	DEIA	ENCA	ENCA	ENCA	ENCA	SNBL
Prof. (m)	-10	-8	-6	-4	-1	-2	-10	-8	-12	-10	-14
Media (µm)	257.0	273.7	319.0	4049	290.1	1633	448.3	718.5	352.3	631.7	506.1
Sorting (µm)	1.510	1.553	1.450	1.688	1.517	1.754	1.500	1.572	1.503	1.376	1.465
Skewness	0.020	0.031	0.007	0.222	0.016	-0.03	-0.01	0.085	0.002	0.002	-0.02
Sorting	0.948	0.958	0.954	0.876	0.950	1.069	0.937	1.048	0.941	0.959	0.940
Tipo sed.	mwsms	mwsms	mwsms	vfg	mwsms	svfg	mwsms	sfgcs	mwsms	wscs	mwsms
% gravas muy gruesas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% gravas gruesas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% gravas medias	0.0	0.0	0.0	9.9	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
% gravas finas	0.0	0.0	0.0	36.8	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0
% gravas muy finas	0.0	0.0	0.0	52.0	0.0	32.6	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
% arenas muy gruesas	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	50.8	1.5	18.7	0.1	7.6	2.9
% arenas gruesas	5.4	9.0	11.6	0.0	10.0	12.3	38.7	56.7	20.2	68.7	48.6
% arenas medias	46.8	48.2	62.0	0.0	53.2	4.2	52.2	20.6	58.9	23.7	45.7
% arenas finas	44.5	39.9	26.2	0.0	35.4	0.1	7.6	0.1	20.8	0.0	2.8
% arenas muy finas	3.3	2.8	0.1	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
% limos muy gruesos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% limos gruesos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% limos medios	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% limos finos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% limos muy finos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
% arcillas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 4. Parámetros granulométricos del sedimento sumergido de Cala Deià. DEIA: Cala Deià; ENCA: s'Encolla; SNBL: Caleta de Son Beltran. MWSMS: arenas medias moderadamente bien clasificadas; MWSCS: arenas gruesas moderadamente bien clasificadas; WSCS: arenas gruesas bien clasificadas; VFG: gravas muy finas; SVFG: gravas muy finas con arenas; SFGCS: arenas muy gruesas con gravas finas.

10.3 Caracterización del sedimento de la playa emergida

El análisis combinado de dimensión, forma y procedencia de los cantos y bloques de la playa emergida de Cala Deià arroja un valor medio del eje máximo de los bloques entre 20,9 y 31,7 cm (Tabla 5), lo que nos ubica entre las categorías texturales de cantos grandes y bloques pequeños. No obstante se trata de una acumulación de clastos heterométrica, como ponen de manifiesto las elevadas desviaciones estándar y el rango de calibre que oscila entre 3 y 107 cm (Tabla 5).

La mayoría de los bloques tienen una forma isométrica, característica del modelado fluvial (Benn, 1994) y tan sólo los de menores dimensiones adoptan formas discoidales propias del modelado costero (Bluck, 1967). La mayoría de los

clastos tienen una forma entre sub-angular y redondeada (Tabla 5) lo que implica que han sido transportados. Incluso hay ejemplos de clastos con perforaciones de organismos marinos que indican que los cantos y/o bloques han permanecido durante un periodo en el fondo de la cala.

En cuanto a la procedencia de los clastos en todos los puntos de muestreo más del 50% de éstos son fragmentos de rocas Jurásicas (Tabla 5). Siendo los roquedo miocenos que afloran en el flanco oriental de la cala la segunda fuente de procedencia.

Todo ello pone de manifiesto que la principal fuente de bloques, cantos y gravas que alimentan la playa –puesto que la proporción de sedimento biogénico es muy baja y los clastos y bloques de formas discoidales tienen una representación baja– es el desmantelamiento de los acantilados sedimentarios cuaternarios que se disponen en los flancos del torrent Major y al pie de la playa. Se trata de aluviones, en los que la matriz es de gravas y limosa, y los bloques proceden del desmantelamientos de los relieves jurásicos de la Sierra.

	CD1.1	CD1.2	CD.2.1	CD2.2	CD2.3	CD3.1	CD3.2	CD3.3
Dimensiones eje máximo (cm)								
N	50	50	50	50	50	50	50	50
Promedio	21.05	20.90	31.74	28.84	27.66	24.08	26.98	24.88
Desviación estándar	15.02	17.80	21.79	18.09	22.91	14.66	16.09	16.42
Rango	5 – 76	5 – 105	5 – 107	3 – 90	4 – 85	5 – 70	6 – 70	8 – 64
Forma								
Muy angular	0	0	2	4	24	4	0	0
Angular	0	8	2	4	6	14	12	0
Sub-angular	44	28	40	30	22	32	48	46
Sub-redondeado	32	50	32	26	10	24	32	48
Redondeado	24	14	18	28	34	26	8	6
Muy redondeado	0	0	6	8	4	0	0	0
Geología								
Jurásico	64	66	66	54	80	74	66	72
Triásico	0	0	2	18	10	8	6	12
Mioceno	36	34	28	28	10	16	28	16
Cuaternario	0	0	4	0	0	2	0	0

Tabla 5. Morfoscopia de cantos de la playa emergida de Cala Deià.

11. Modelo de funcionamiento de la playa

11.1 Esquema de formación de la playa

La playa de Cala Deià se ha formado a partir del dismantelamiento del acantilado sedimentario como se explica en los estudios sedimentológicos. En la Fig. 24 se muestran, a modo de modelo, los tres estadios de formación de una playa a partir de un acantilado no-cohesivo.

En el estadio (a) el oleaje llega al pie del acantilado y ya que la pendiente batimétrica es grande, se disipa en una zona muy estrecha cerca de la costa llegando al pie del acantilado con gran energía dismantelándolo. Como consecuencia se va formando una acumulación de bloques, cantos y gravas al pie del mismo.

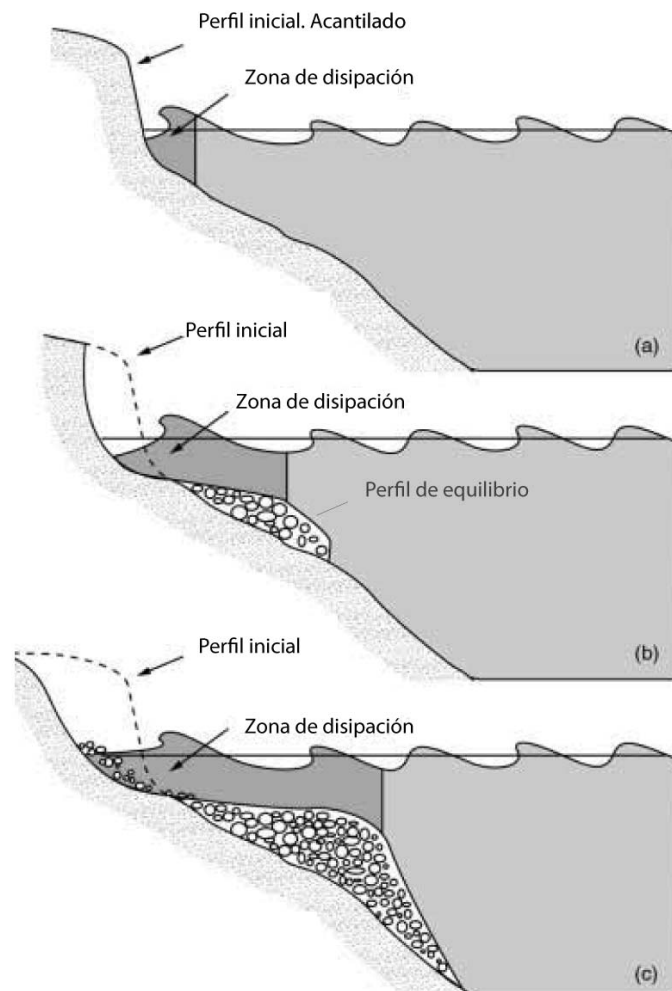


Fig. 24. Diagrama esquemático de la formación de la playa en tres estadios temporales diferentes. Adaptado de Dean y Dalrymple (2002).

A medida que estos sedimentos se van acumulando y movilizándose, el perfil batimétrico cambia, reduciendo la pendiente y aumentando la zona de disipación del oleaje. Como consecuencia, los grandes bloques formados por el desmantelamiento son retrabajados y forman calibres menores (estadio (b) Fig. 24).

El estadio final coincide con la recolocación de todo el sedimento a lo largo del fondo de la cala –confinado por la topografía– aumentando la zona de disipación hasta una profundidad de cierre –estadio (c) Fig. 24-. En este último estadio, la misma acumulación de bloques al pie del acantilado, dadas sus dimensiones, está protegiendo al mismo de la acción del oleaje. Alcanzándolo sólo los temporales más energéticos.

11.2 Evolución Morfodinámica

La orientación y situación de Cala Deià la hacen especialmente vulnerable a los temporales del N y NE que son frecuentes desde Octubre hasta Marzo. Oleajes con alturas de ola de 2 metros son habituales y con una periodicidad intra e interanual que determinan la estabilidad y forma de la playa. Estos oleajes sin ser extraordinariamente energéticos tienen una frecuencia a lo largo del año que condicionan la forma en planta. Estas olas entran en la zona sin ser afectadas por la morfología costera y sin modificar su altura hasta que actúan sobre el centro de la Cala –(1) en Fig. 25-. Las mayores alturas de ola se producen sobre la parte oeste de la Cala donde también está la mayor disipación. Las corrientes inducidas por la rotura en la zona más somera produce un transporte litoral del sedimento menos grueso (gravas muy finas a arenas finas) de W a E –(2) en fig. 25- modificando la forma en planta de la playa y provocando un basculamiento de la misma –esquemáticamente (3) Fig. 25 donde la planta inicial se representa en rojo y la basculada en amarillo-.

En esta situación no hay una gran modificación del perfil de la Cala debido al tamaño de sedimento que la conforma (grandes bloques). El retorno a la situación original en la planta se producirá con los régimen medio que domina el clima marítimo en la zona.

Esta situación se ve alterada por temporales intensos con alturas de ola superiores a los 10 m, también de dirección Norte que tienen un período de retorno de aproximadamente 20 años. Estos temporales inciden directamente en la Cala (la propagación correspondiente a uno de estos eventos ocurrido en Diciembre de 1980 se muestra en la Fig. 20). Estos temporales, modifican en gran medida la forma del perfil ya que tienen gran capacidad de movilizar el sedimento al ser poco disipados hasta profundidades bajas –(1) en Fig. 26-. La respuesta del perfil para disipar la energía es movilizar el sedimento para conseguir un perfil más disipativo –(2) en Fig. 26-. El sedimento más fino (menor d_{50}) es trasladado hacia la parte más profunda de la playa quedándose depositado en esta zona (área (a) en la Fig. 26). A lo largo de la cala el sedimento se distribuye con un gradiente de tamaño negativo desde costa hasta la zona más profunda (d_{50} creciendo desde el área (a)



Fig. 25. Diagrama esquemático de la respuesta de la Cala frente a temporales intra-anales.

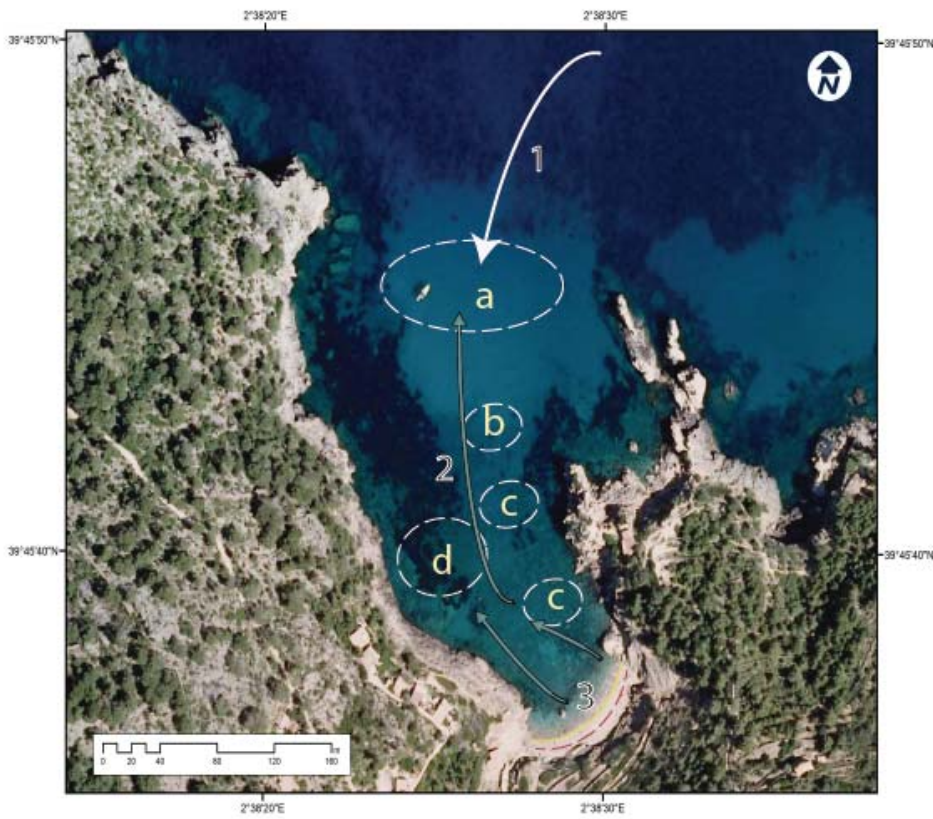


Fig. 26. Diagrama esquemático de la respuesta de la Cala frente a temporales extremos.

hasta el área (c) en la Figura 26). Los tamaños de sedimento mayores se movilizan hacia la zona (d) en la Fig. 26 dónde mayores alturas de ola se concentran. La consecuencia en la planta de la playa es un retroceso general de la línea de costa con un pérdida significativa de playa emergida (mostrado esquemáticamente en el paso (3) en la Fig. 26 dónde la planta original representada en amarillo pasa a la línea roja discontinúa). Este proceso condiciona la morfología de la playa durante un gran período de tiempo: los procesos destructivos (entendidos como pérdida de playa seca) que suceden en escalas de horas-días tienen una memoria elevada siendo el proceso de recuperación de años y condicionados a los pequeños temporales indicados en el proceso anterior (Fig. 25).

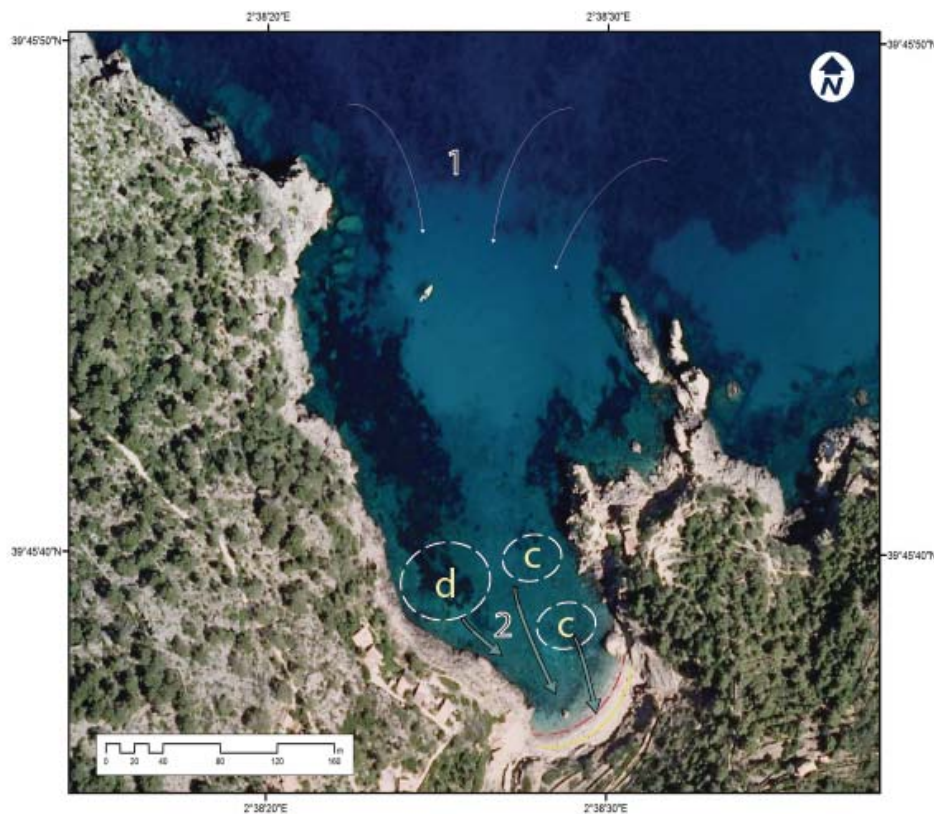


Fig. 27. Diagrama esquemático de la respuesta de la Cala frente al régimen medio.

El proceso de recuperación y la tendencia hacia la playa de equilibrio se produce con el régimen medio y como respuesta lenta del perfil. Bajo estas condiciones el sedimento de tamaño medio que está en las zonas (c) y (d) de la cala es movilizado hacia la playa seca; el pendiente del perfil pasa a ser más acentuado, modificándose eventualmente la línea de costa, aumentando la playa seca (esquemáticamente mostrado en la Fig. 27 dónde pasa de la planta inicial en amarillo continuo al rojo discontinuo). El sedimento menos grueso que ha sido desplazado a profundidad mayor a 8 m (área (a) en la Fig. 26) queda depositado en esa zona siendo difícilmente movilizado por las condiciones resultantes del régimen medio.

Bibliografía

- Balaguer, P. 2006. *Tipus i evolució de les costes rocoses de Mallorca*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Palma. 373 pp.
- Benn, D.I., 1994. Fabric shape and the interpretation of sedimentary fabric data. *Journal of Sedimentary Research*, A64: 910-915.
- Blott, S.J., Pye, K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237-1248.
- Bluck, B.J. Sedimentation of beach gravels: examples from south Wales. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 128-156.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 1: 688-703.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 2002. Coastal processes with Engineering applications. Cambridge University Press. Cambridge 475 pp.
- Dolan, R., Fenster, M.S., Holme, S.J. 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7: 723-724.
- Evans, D.J.A. 1999. Glacial debris transport and moraine deposition: a case study of the Jardalen cirque complex. Sogn-og-Fjordane, western Norway. *Z. Geomorph. N.F.*, 43: 203-234.
- Gelabert, B. 1998. *La estructura geológica de la mitad occidental de la isla de Mallorca*. ITGME, Madrid. 129 pp.
- Genz, A.S., Fletcher, C.H., Lunn, K.A., Frazer, L.N., Rooney, J. 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 23: 87-105.
- Gómez-Pujol, L. 1999. Sedimentologia i evolució geomorfològica quaternària del ventall al·luvial des Caló (Betlem, Artà, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 42: 107-124.
- Mateos, R. 1999. Diversos aspectos geotècnics de la Serra de Tramuntana de Mallorca: riscos geològics associats. In Fornós, J.J. (ed.), *Aspectes Geològics de les Illes Balears*: 435-457. Universitat de les Illes Balears, Palma.
- Mateos, R., García-Moreno, I., Azañón, J.M. 2012. Freeze-thaw cycles and rainfall as triggering factors of mass movements in a warm Mediterranean region: the case of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). *Landslides*, 9: 417-432.
- Ojeda, J. 2000. Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30: 103-118.
- Rodríguez-Perea, A. 1984. *El Mioceno de la Serra Nord de Mallorca. Estratigrafía, sedimentología e implicaciones estructurales*. Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 501 pp.
- Thieler, E.R, Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Miller, T.L., 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versión 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. US Geological Survey Open File Report. 2005-1303. 33 pp.

Anexo 1. Batimetría de detalle en Cala Deià.

Los muestreos para la adquisición de datos batimétricos de Cala Deià se realizaron con una ecosonda multihaz Sonic 2020 capaz de adquirir información batimétrica entre una profundidad mínima de 0,5 m y máxima de 100 m. La ecosonda se instaló mediante un soporte lateral de acero inoxidable, sobre una embarcación neumática marca Valiant Modelo DR-600 propulsada por un motor fueraborda Yamaha de 115 Hp. La embarcación tiene 6,0 m de eslora (longitud), 2,5 m de manga (anchura) y un peso conjunto (embarcación y motor fueraborda) de unos 600 kg. Esta configuración permitió realizar la batimetría hasta el rango de medida de la ecosonda. Las especificaciones técnicas de la sonda multihaz Sonic 2020 se describen en la Tabla A1.

SONDA MULTI-HAZ SONIC 2020. Resumen de características técnicas	
Frecuencia	200 – 400 kHz
Ancho de banda	60 kHz
Ancho de haz	2º - 2º a 400 kHz 4º - 4º a 200 kHz
Ángulo de apertura	10º - 130º
Profundidad máxima de muestreo	100 m
Profundidad mínima de muestreo	0,5 m
Ratio de pin	60 kHz
Resolución de profundidad	12,5 mm
Máximas medidas por pin (nº. de haces)	256
Temperatura óptima de operatividad	10ºC - 50 ºC
Temperatura óptima de almacenamiento	20ºC - 55ºC
Red eléctrica necesaria	90 – 256 VAC; 45 – 65 Hz
Consumo de potencia	20 W

Tabla A1. Especificaciones del muestreo con la sonda multihaz.

La batimetría se realizó entre las cotas batimétricas comprendidas entre 0.5 y 30 m a una velocidad media aproximada de 4 nudos. La toma de datos se realizó de acuerdo con el seguimiento de la dirección de los diferentes transeptos señalados en la Fig. A1 procurando el solapamiento de los haces emitidos por la zona con la finalidad de conseguir la mayor resolución posible del fondo marino. El área cubierta por la batimetría de detalle realizada con la sonda multihaz comprende el interior de Cala Deià y el ámbito comprendido entre Punta Deià y Sa Caleta de Son Beltràn (Fig. A1) cubriendo un área aproximada de 500.000 m² equivalente a 0.5 km².

En el interior de Cala Deià la toma de datos se realizó de acuerdo con una dirección NW-SE, en cambio en el exterior de la cala (área comprendida entre Punta Deià y Caleta de Son Beltrán) la dirección del muestreo fue SW – NE ya que el trazado de los haces de la sonda tenían un mayor paralelismo con las curvas batimétricas y de este modo el solapamiento de éstos fue más sencillo.

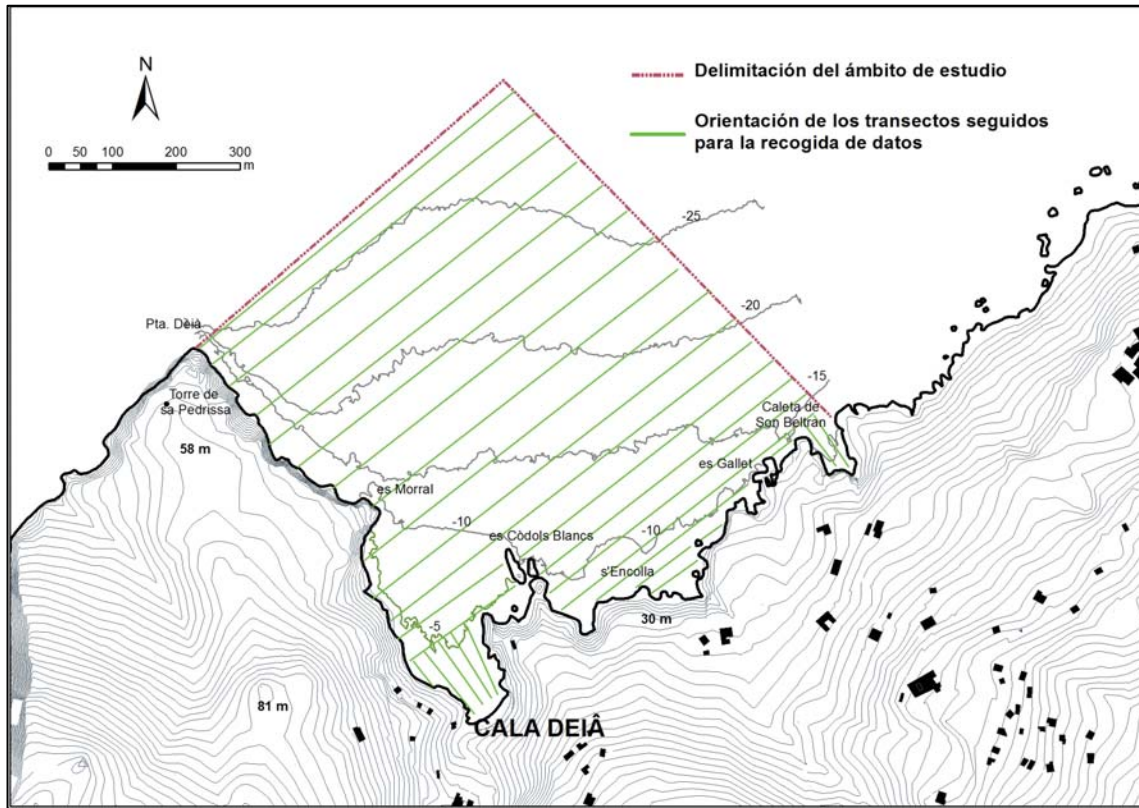


Fig. A1. Área cubierta y transeptos realizados durante el muestreo batimétrico.