



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Procesos de enterramiento en las concreciones calcáreas  
de plataforma.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Evaluación y Seguimiento Ambiental de  
Ecosistemas Marinos y Costeros

AUTOR/A: Contreras Casado, Valeria Isabel

Tutor/a: Rodilla Alamá, Miguel

Cotutor/a externo: RODRIGUEZ LOPEZ, ELENA

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## **Agradecimientos**

A Elena Rodríguez-López por toda su ayuda y sus consejos.

A Miguel Rodilla, por la ayuda durante la tutoría de este trabajo.

A mi familia y amigos, por su apoyo y ánimos.

A Paula, por apoyarme en todo.

## **Resumen**

El coralígeno es una biocenosis compuesta por algas rojas calcáreas del orden Corallinales que crecen en ambientes de escasa luminosidad, siendo este el factor ambiental más importante para su desarrollo y distribución. Una de las principales amenazas del coralígeno es el cambio climático, ya que perturba la ecología y biología de sus organismos. Además, sus efectos son cada vez más frecuentes y con mayor magnitud, como los eventos meteorológicos extremos. Se ha observado un enterramiento de las formaciones que se puede atribuir a un transporte de sedimento, provocado principalmente por el oleaje intenso inducido por tormentas extremas. En este trabajo se ha evaluado la situación de enterramiento que ha sufrido un enclave de coralígeno situado entre 13 y 17 m de profundidad frente a la costa de Gandía, con una biodiversidad importante para la pesca. Para ello, se han realizado inmersiones con escafandra autónoma para recoger muestras, y así realizar un análisis granulométrico por capas para establecer el tipo de sedimento transportado y estudiar el fenómeno de enterramiento.

**Palabras clave:** coralígeno, biodiversidad, sedimentación, cambio climático, hábitats

## **Abstract**

The coralligenous is a biocenosis composed of calcareous red algae of the order Corallinales that grow in low light environments, which is the most important environmental factor for its development and distribution. One of the main threats to coralligenous is climate change since it disturbs the ecology and biology of its organisms. Furthermore, its effects are becoming more frequent and of greater magnitude, such as extreme weather events. A burial process of the formations has been observed, which can be attributed to sediment transport, caused mainly by intense waves induced by extreme storms. In this work, this process has been evaluated, with focus on a coralligenous enclave located between 13 and 17 m deep off the coast of Gandía, with important biodiversity for fishing. To this end, scuba dives have been carried out to collect samples and thus accomplish a granulometry analysis by layers, to establish the type of sediment transported to study the burial phenomenon.

**Keywords:** coralline, biodiversity, sedimentation, climate change, habitats

# Índice

Índice de figuras .....	4
Índice de Tablas .....	6
1. Introducción .....	7
1.1. Estructura .....	7
1.2. Cambio climático e impactos .....	9
2. Objetivos.....	13
3. Materiales y métodos.....	13
3.1. Zona de estudio.....	13
3.2. Diseño del muestreo y etapas .....	15
4. Resultados.....	24
4.1. Tamaño de grano .....	25
4.2. Altura de ola y tormentas .....	37
5. Discusión.....	39
6. Conclusiones .....	43
7. Trabajo futuro .....	43
8. Bibliografía.....	44
Anexos.....	50
Anexo 1.....	50
Anexo 2.....	68

## Índice de figuras

Figura 1-1. Partes de la morfología de un coralígeno. Rodríguez-López (2020) .....	9
Figura 1-2. Valores máximos de variables oceánicas durante el Gloria en la costa española mediterránea. (a) Datos de ola significativa. (b) Período de ola medio. (c) Velocidad de corriente. (d) Nivel del mar residual. (e) Amplitud de las oscilaciones del nivel del mar de alta frecuencia. (Alvarez-Fanjul et al., 2022). .....	11
Figura 1-3. Mapa de altura significativa de ola durante el Gloria. (a) 20-01-2020 02 UTC. (b) 20-01-2020 06 UTC. (c) 20-01-22020 13 UTC. (d) 21-01-2020 00 UTC. Coinciden con el pico de tormenta medido en Dragonera, Valencia, Tarragona y Begur respectivamente. ....	12
Figura 3-1. Coralígeno de la zona de estudio. (Rodríguez-López et al., 2023).....	14
Figura 3-2. Ejemplos de zonas del coralígeno cubiertas de sedimento. ....	15
Figura 3-3. Obtención de una de las muestras de sedimento. ....	16
Figura 3-4. Mapa de los muestreos en la zona de estudio con la profundidad medida y la comunidad de algas coralígenas. ....	18
Figura 3-5. Tamizador utilizado para el estudio granulométrico. ....	19
Figura 3-6. Tamices usados para el estudio granulométrico. ....	19
Figura 3-7. Muestras de sedimento secándose en la estufa. ....	20
Figura 3-8. Relación entre tipos de ola y periodo, frecuencia, longitud de onda y energía (An Open University Course Team, 1989b).....	22
Figura 4-1. Gráfico del modelo ajustado con la profundidad (m) y el tamaño medio ( $\phi$ ) de las muestras. En un círculo está marcado el Core 10. ....	24
Figura 4-2. Gráfico de residuos estudentizados según la profundidad (m) y el tamaño medio ( $\phi$ ). En un círculo está marcado el Core 10. ....	24
Figura 4-3. Relación entre tamaño de grano y tipo de sedimento. (Blair & McPherson, 1999). ....	25
Figura 4-4. Histograma de la distribución del tamaño de grano $\phi$ . ....	28
Figura 4-5. Diagrama de frecuencias de la distribución del tamaño de grano $\phi$ . ....	28
Figura 4-6. Curva de frecuencias acumulativas con el tamaño de grano $\phi$ . ....	28
Figura 4-7. Diagrama barro-gravilla-arena de las muestras analizadas. Se observa la predominancia de arenas de distintos tamaños. ....	29
Figura 4-8. Diagrama arena-limo-arcilla de las muestras analizadas. En conjunto, se observa cómo predomina la arena. ....	29
Figura 4-9. Gráfico con la latitud y el porcentaje de arenas finas de las muestras. ....	31
Figura 4-10. Gráfica de la latitud y el porcentaje de arenas muy finas de las muestras. ....	31
Figura 4-11. Gráfica de la latitud y el tamaño medio de grano de las muestras, donde el tamaño medio $\phi$ de 2 es equivalente a 250 $\mu\text{m}$ y el de 3 a 125 $\mu\text{m}$ . ....	32
Figura 4-12. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas finas y la latitud. .	33
Figura 4-13. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas muy finas y la latitud. ....	33

Figura 4-14. Gráfica del modelo ajustado del tamaño medio de grano de las muestras y la latitud, donde el tamaño medio $\phi$ de 2 es equivalente a 250 $\mu\text{m}$ y el de 3 a 125 $\mu\text{m}$ . .....	34
Figura 4-15. Gráfica de la profundidad y el tamaño medio de grano las muestras, donde el tamaño medio $\phi$ de 2 es equivalente a 250 $\mu\text{m}$ y el de 3 a 125 $\mu\text{m}$ . .....	35
Figura 4-16. Gráfica del modelo ajustado de la profundidad y el tamaño medio de grano de las muestras, donde el tamaño medio $\phi$ de 2 es equivalente a 250 $\mu\text{m}$ y el de 3 a 125 $\mu\text{m}$ . .....	35
Figura 4-17. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas finas y la profundidad. ....	36
Figura 4-18. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas muy finas y la profundidad. ....	36
Figura 4-19. Dendograma resultante del análisis de conglomerados con el método del vecino más cercano y euclídeana cuadrada. ....	37
Figura 4-20. Número de eventos de tormenta con olas mayores a 2'45 metros al año en la costa de Gandía, entre 1980 y 2023. ....	38
Figura 4-21. Altura máxima de las olas en la costa de Gandía al año, entre 1980 y 2023. ....	38
Figura 5-1. a) Imagen de antes de una parte del coralígeno. b) y c) son imágenes de después, donde las algas calcáreas han quedado tapadas por la arena. ....	40
Figura 5-2. Diagrama Hjulström-Sundborg con las relaciones entre el tamaño de la partícula y la velocidad de las corrientes, donde las partículas pueden ser transportadas, erosionadas o depositadas (Earle, 2015). ....	41
Figura 5-3. Mapa de las muestras y profundidades cartografiadas por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar. ....	42

## Índice de Tablas

Tabla 3-1. Nombres de los cores, sus fechas y la profundidad a la que se tomaron las muestras.....	16
Tabla 4-1. Resultados de los parámetros estadísticos calculados para cada muestra.....	26
Tabla 4-2. Descripción de los parámetros estadísticos del análisis granulométrico, a partir del método de Folk y Ward. ....	26
Tabla 4-3. Valores y descripciones medios de los resultados del análisis de las muestras.....	27
Tabla 4-4. Porcentaje de diferentes tipos de arena encontrados en las muestras.....	27
Tabla 4-5. Resultados del p-valor del estudio de las relaciones entre las variables. Los valores marcados son estadísticamente significativos. ....	29
Tabla 4-6. Grupos formados en el análisis de conglomerados y los porcentajes correspondientes de arenas finas y muy finas. ....	37

# 1. Introducción

En el mar Mediterráneo hay una gran diversidad de fondos. Existen fondos duros, blandos y detríticos. La biodiversidad asociada a ciertos fondos los hace un objeto de estudio muy interesante.

Las concreciones calcáreas en fondos marinos están compuestas por el coralígeno, una biocenosis compuesta por algas rojas calcáreas del orden *Corallinales*. Estas algas crecen en ambientes poco iluminados (esciáfilos), factor ambiental que influye enormemente en su desarrollo y distribución. Los fondos de coralígeno son un *hotspot* de biodiversidad en el Mediterráneo. Esta bioconstrucción presenta hasta un 10% de la biodiversidad marina del Mediterráneo, por la propia estructura llena de recovecos y cuevas donde viven peces de interés pesquero, y es además lugar de cría. Se ve influenciada por el cambio climático (altas temperaturas, erosión, procesos de enterramiento, cambios de pH) y el impacto humano (Ballesteros, 2006).

A causa de las actividades humanas, las especies y hábitats han ido disminuyendo (UNEP/MAP RAC/SPA, 2010). El Mediterráneo, según algunos modelos climáticos, será una de las regiones más afectadas por el calentamiento progresivo y eventos climáticos extremos (Galli et al., 2017; Lejeune et al., 2010). Por tanto, la combinación de impactos humanos y del cambio climático dará lugar a fenómenos como la eutrofización y mayor carga de sedimentos (Rindi et al., 2019).

Estas formaciones de algas calcáreas esconden organismos como corales, esponjas, tunicados, briozoos, entre otros. Aunque estas algas tengan un papel fundamental en fondos de coral y coralígenos, los animales bentónicos son los principales constructores de arrecifes, como también los principales componentes en la estructuración de la complejidad de un arrecife (Paoli et al., 2017). Los fondos de coralígeno no sólo presentan una alta biodiversidad, sino que también ejercen un papel fundamental en el bienestar humano gracias a los servicios y beneficios que otorga su existencia: aportan comida, abundancia de peces, reciclaje de nutrientes, secuestran carbono, entre otras funciones (Paoli et al., 2017).

La importancia que tienen los fondos de coralígeno se ha reconocido en marcos de conservación nacionales, europeos e internacionales, tales como la Directiva Marco Europea del Agua (DMA). El marco legal para la gestión de las aguas marinas europeas reconoció las bioconstrucciones marinas bajo la categoría de “arrecifes” como hábitats dignos de protección (European Community, 1992). El coralígeno está incluido como hábitat protegido en el Reglamento relativo a las medidas de gestión para la explotación sostenible de los recursos pesqueros en el mar Mediterráneo, como también en la Directiva Hábitats como Hábitat tipo 1170 Arrecifes (Gobierno de España, 2019). El coralígeno además está listado como hábitat de interés para su conservación en el Convenio de Barcelona.

Aun así, aunque existen estudios sobre estos fondos (Paoli et al., 2017; Bracchi et al., 2016; Piazzini et al., 2012; Rodríguez-López, 2020), sigue existiendo una falta de información vital necesaria para las estrategias que puedan asegurar su conservación (Çinar et al., 2020). Dicha falta de información se hace cada vez más relevante debido a las crecientes amenazas que sufre el coralígeno por acciones antropogénicas y por el cambio climático (Claudet & Fraschetti, 2010; Coll et al., 2010; Garrabou et al., 2019).

## 1.1. Estructura

Las concreciones de coralígeno en el Mediterráneo son las únicas formaciones calcáreas bentónicas de origen biogénico de este mar (Ballesteros, 2006). Suelen estar

en el circalitoral, pero también pueden encontrarse en el infralitoral, desde los 20 m hasta los 120 m de profundidad (Ballesteros, 2006; Regional Activity Centre for Specially Protected Areas, 2003). Esto se debe a que la formación de coralígeno depende de la cantidad de luz o irradiancia que llegue al fondo marino (Ballesteros, 2006). En aguas claras puede acabar formándose en zonas más profundas, mientras que, si las condiciones de luz son las adecuadas, puede encontrarse a menor profundidad. Esto se debe a que requiere cierta iluminación, pero no en exceso. Por ejemplo, en la zona de estudio se encontró fondos de coralígeno a 15 metros de profundidad, mientras que en zonas de pendientes verticales cerca de Marseilles, la profundidad a la que se puede encontrar coralígeno es de entre 20 y 120 metros (Ballesteros, 2006; Thierry de Ville d'Avray et al., 2019). Según Rodríguez-López (2020), la morfología del coralígeno en la zona de estudio es más compacta y heterogénea a mayor profundidad, y se encuentra cohabitando con otros ecosistemas como las praderas de fanerógamas.

Existen diferentes formas de clasificar el coralígeno (Ballesteros, 2006). Por ejemplo, en cinco tipos diferentes: concreciones en fondo de pared, concreciones sobre fondos rocosos, concreciones en cuevas, concreciones en pared y coralígeno de plataforma.

El coralígeno puede dividirse en otros dos tipos (Ballesteros, 2006):

- Banco: la estructura es plana, con un espesor de 0'5 a 4 m. Se encuentran sobre sustratos horizontales.
- Borde: la estructura es vertical, y suele encontrarse a menor profundidad.

Esta clasificación basada en la geometría del sustrato (horizontal o vertical) lleva a la conclusión de que siempre que se encuentre en la plataforma continental es por tanto coralígeno de banco, y por ello suele denominarse coralígeno de plataforma. Por otro lado, el coralígeno de borde se conoce como coralígeno de pared o de acantilado (Ballesteros, 2006). El de plataforma, que es el objeto de este estudio, se desarrolla en fondos de sedimentos con un nivel de hidrodinamismo mediano. Pueden llegar a alcanzar un grueso de 3-4 metros (Regional Activity Centre for Specially Protected Areas, 2003).

Diferentes autores plantean una clasificación del coralígeno de plataforma según su morfología (Bracchi et al., 2017): en bloques, parches, bancos (Sarà, 1968); pilares verticales (Di Geronimo et al., 2002); arrecifes algales (Bosence, 1983, 1985); bancos algales en forma de boca (Toscano & Sorgente, 2002); agregaciones de arrecifes diminutos (Georgiadis et al., 2009); y columnas y crestas (Bracchi et al., 2015). Todos estos se corresponden con la categoría de banco (Bracchi et al., 2017).

La forma del coralígeno se divide en borde y superficie, donde el borde es la zona más inclinada (Figura 1-1). En el estudio de Rodríguez-López (2020) en la zona de estudio, se observaron diferencias entre borde y superficie de la plataforma, donde el borde presentaba más diversidad de especies que en superficie. Esto seguramente se debe a que el borde tiene condiciones más esciáfilas, y su orientación las protege de corrientes fuertes.

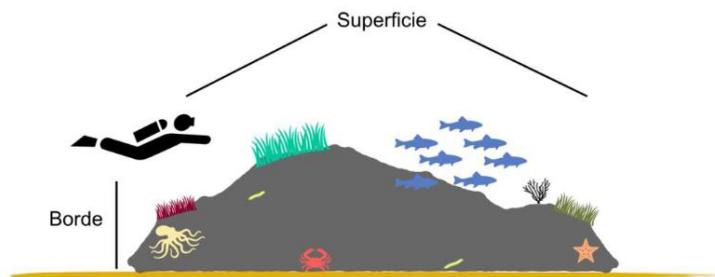


Figura 1-1. Partes de la morfología de un coralígeno. Rodríguez-López (2020)

Las principales especies que se encuentran, que son bioconstrutoras, son *Lithophyllum stictaeforme* y *Mesophyllum alternans* (Rodríguez-López, 2020). Ésta última es la que se considera más común del género *Mesophyllum* que forma coralígeno (Ballesteros, 2006). Ambas son algas de crecimiento lento y longevas, pero presentan estrategias de crecimiento diferentes, donde *L. stictaeforme* es conservadora y *M. alternans* es oportunista (Garrabou y Ballesteros, 2000). Estas estructuras pueden tardar hasta 5000 años en formarse a causa de la tasa de crecimiento, que para *M. alternans* es de entre 0'1 y 0'3 mm/año, haciéndolos buenos indicadores paleobatimétricos (Fundación Oceana, 2008).

Hay presentes otras especies de algas rojas constructoras, como *Neogoniolithon mamillosum* y *Peyssonnelia sp* (Rodríguez-López, 2020). Algunos invertebrados también son constructores en estos ambientes, como los poliquetos serpúlidos y los briozoos (Rodríguez-López, 2020). No sólo se encuentran especies constructoras, ya que éstas conviven con organismos bioerosionadores, como los erizos y los anélidos, escondidos entre los huecos del coralígeno (Ballesteros, 2006).

En el estudio de Rodríguez-López (2020) se han identificado especies invasoras de algas, *Lophocladia lallemandii* y *Womersleyella setacea*, y una exótica, *Caulerpa racemosa* var. *Cylindracea*. De especies endémicas, se encuentran las algas pardas (*Cystoseira foeniculacea* f. *foeniculacea*, *Cystoseira spinosa* var. *spinosa*, *Cystoseira spinosa* var. *compressa* y *Cladosiphon mediterraneus*), especies de esponjas (*Spirastrella cunctatrix*, *Phorbas tenacior* y *Fasciospongia cavernosa*) y briozoos (*Adeonella calveti*). En ese estudio, se observó que la ecocartografía de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar y el fondo no coinciden, por poca precisión, por destrucción del coralígeno o por el fenómeno de enterramiento.

## 1.2. Cambio climático e impactos

Existen un creciente número de fenómenos en el Mediterráneo que se asocian al cambio climático, como son la sequía, las inundaciones, la acidificación, y las olas de calor, que se están volviendo cada vez más largos y/o intensos (Ali et al., 2022). Además, se prevé que durante el siglo XXI estos cambios se irán intensificando en el Mediterráneo.

El incremento de temperatura por el cambio climático entorpece la producción de carbonato cálcico, y por tanto afecta al coralígeno (Fundación Oceana, 2008). Se calcula que las tasas de calentamiento anuales y en verano aumentarán en un 20 y 50% respectivamente de la media anual global (Ali et al., 2022). Además, se calcula que, para el final del siglo XXI, el mar se calentará en un 0'8-3'8°C en aguas superficiales, un 0'8-3°C en aguas intermedias, y un 0'15-0'18°C en aguas profundas (Darmaraki et al., 2019; Soto-Navarro et al., 2020).

El incremento de temperatura del mar provoca una transferencia de calor de mayor intensidad, que se traduce en mayores formaciones nubosas por evaporación, y consecuentemente la lluvia es más concentrada en tiempo y espacio, especialmente en otoño (Sánchez-Almodóvar et al., 2022). La comunidad autónoma de Valencia es una de las regiones con mayor número de eventos extremos de lluvia, según un análisis donde se estudió el periodo de tiempo entre 1980 y 2015 (Insua-Costa et al., 2021). Además, este fenómeno se puede asociar a un mayor número de DANA al este de la Península Ibérica (Ferreira, 2021). Estas tormentas extremas podrían estar provocando un fenómeno de enterramiento, originado por el oleaje intenso durante las tormentas al arrastrar el sedimento.

El Mediterráneo es un mar micromareal, donde las tormentas pueden asolar las costas durante varias horas o incluso más, y no sólo durante marea alta (Le Cozannet et al., 2015; Sayol & Marcos, 2018). Por el cambio climático, incrementará el nivel del mar y el riesgo de inundaciones, y se estima que la magnitud de las tormentas aumente hasta un 30% localmente en algunas regiones, como en golfos, durante el siglo XXI. Las características y peculiaridades topográficas de las regiones del Mediterráneo influenciarán la variabilidad de las marejadas ciclónicas extremas (Galiatsatou et al., 2023).

En cuanto a las precipitaciones, aunque pueda disminuir el total de lluvias, se espera un incremento en frecuencia e intensidad de las lluvias extremas en algunas regiones. Las precipitaciones probablemente disminuirán en diversas áreas en un 4-22%, dependiendo del escenario de emisiones, mientras que las lluvias extremas aumentarán en el norte del Mediterráneo y habrá sequías más prevalentes en muchas zonas (Ali et al., 2022).

En referencia a la altura de ola, aunque la tendencia creciente del máximo de Hs en la zona del Levante español no es tan marcada como en otras costas del Mediterráneo español, está siendo afectada por eventos únicos más intensos. Éstos son los que causan más daños, haciendo de esta zona particularmente vulnerable (Portillo Juan et al., 2022). Un estudio de Amarouche & Akpınar (2021) evaluó las tendencias en intensidad de olas de tormenta por los últimos 41 años, caracterizadas por altura de ola significativa y duración total de la tormenta. Sus resultados mostraron que una parte importante del oeste del Mediterráneo está experimentando un incremento en energía total de olas de tormenta con una confianza de >95%. Uno de los *hotspots* que experimenta un incremento significativo en intensidad es cerca de las costas de Tarragona, cubriendo gran parte del mar Balear y no muy lejos de Gandía, haciendo probable que ocurran eventos extremos de tormentas en el futuro.

Un ejemplo de tormenta extrema fue la borrasca Gloria, que ocurrió entre el 19 y el 24 de enero de 2020, donde la altura de la ola máxima fue de 8 metros en el Golfo de Valencia. Rompió récords en daños costeros asociados, con una estimación de más de 200 millones de euros, especialmente en Cataluña y Valencia; catorce pérdidas de vidas humanas; además de las altas magnitudes de olas, corrientes y nivel del mar (Alvarez-Fanjul et al., 2022). Afectó a los 518 kilómetros de costa de Valencia, destruyendo infraestructuras (Rodríguez-López, 2020). Los puertos de Valencia y de Gandía cerraron el tráfico marítimo. Su origen fueron las condiciones anómalas anticiclónicas en el centro de Europa, con una presión a nivel del mar superior a 1050 hPa, donde el gradiente de presiones originó un viento del noroeste superior a los 20 m/s (Alvarez-Fanjul et al., 2022). En los días 19 y 20, este viento alcanzó los 115 km/h en Oliva (Valencia). La altura de ola significativa local (Hm0) alcanzó el 1'03 m en Gandía, mientras que el componente de la marejada alcanzó los 54 cm por encima del nivel medio del mar. En

Gandía se alcanzó un récord histórico en nivel total del mar por hora, con 64 cm (Alvarez-Fanjul et al., 2022). Los valores máximos de diferentes variables se observan en las Figuras 1-2 y 1-3. En la Figura 1-2, destaca la altura de ola significativa cerca de la costa de Gandía, mientras que en la Figura 1-3 se observa cómo el día 20 se midieron alturas de ola especialmente altas.

En las costas de Gandía, se ha observado que el emisario submarino situado a 17'5 metros de profundidad quedó sepultado bajo el sedimento después del temporal Gloria. Esto supone una acumulación de 120 cm de sedimento en la cara norte de la conducción (comunicación personal de M. Rodilla, 15 de febrero de 2023).

El aumento de turbidez y el enterramiento que pueden causar este tipo de fenómenos provocan la muerte en el coralígeno, afectando por tanto a la biodiversidad, y puede acabar teniendo consecuencias en la pesca.

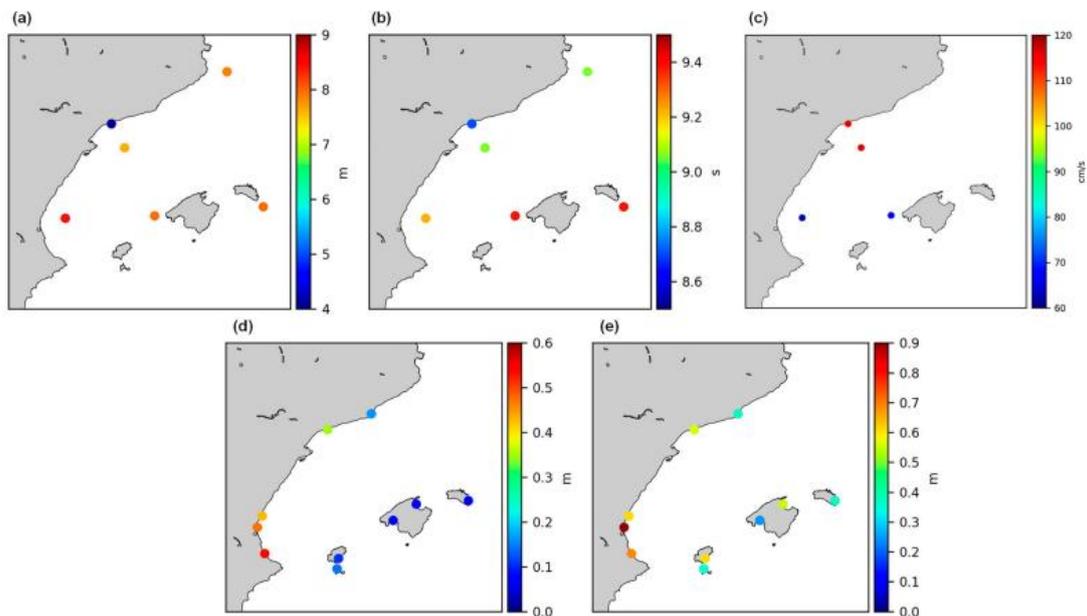


Figura 1-2. Valores máximos de variables oceánicas durante el Gloria en la costa española mediterránea. (a) Datos de ola significativa. (b) Período de ola medio. (c) Velocidad de corriente. (d) Nivel del mar residual. (e) Amplitud de las oscilaciones del nivel del mar de alta frecuencia (Alvarez-Fanjul et al., 2022).

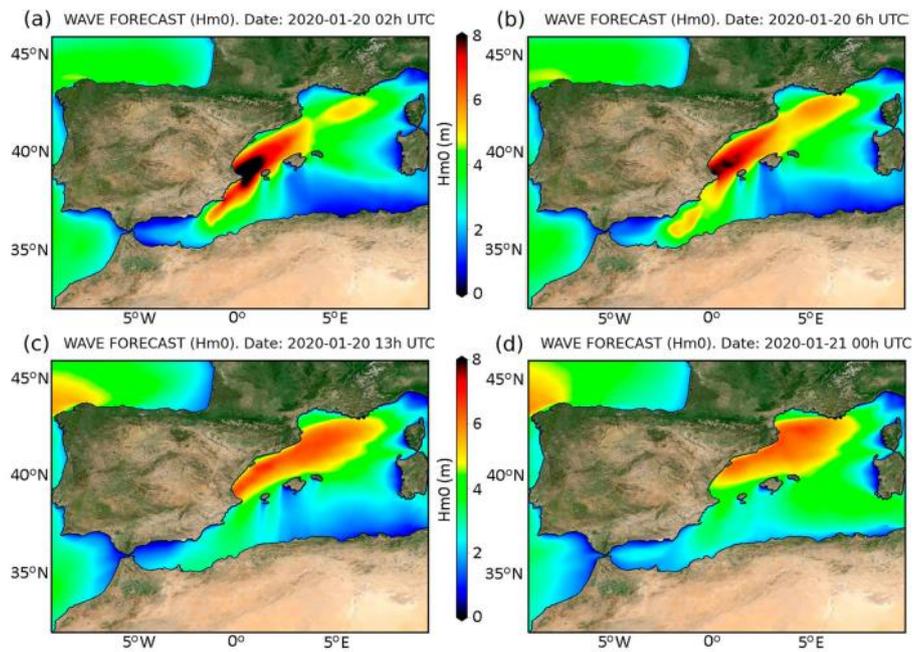


Figura 1-3. Mapa de altura significativa de ola durante el Gloria. (a) 20-01-2020 02 UTC. (b) 20-01-2020 06 UTC. (c) 20-01-2020 13 UTC. (d) 21-01-2020 00 UTC. Coinciden con el pico de tormenta medido en Dragonera, Valencia, Tarragona y Begur respectivamente (Alvarez-Fanjul et al., 2022).

## 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es estudiar el fenómeno de enterramiento de las formaciones calcáreas de zonas someras entre 13 y 17 metros de profundidad frente a la costa del municipio de Gandía.

Para ello, los objetivos específicos son los siguientes:

- Establecer, *in situ*, el enterramiento del borde profundo del arrecife de algas esciáfilas (coralígeno de La Vinyeta).
- Obtener muestras del sedimento para realizar un estudio granulométrico.
- Estudiar la evolución de la altura de ola y temporales históricos para relacionar sus cambios como una posible causa del enterramiento.
- Estudiar si existe un patrón geográfico de la distribución de tipos de sedimento.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Zona de estudio

En la plataforma del Golfo de Valencia (sur) se encuentra un fondo coralígeno. El fondo del Golfo es arenoso, sin gran biodiversidad, salvo por estas estructuras calcáreas donde además de su alta biodiversidad, también se encuentran praderas de *Posidonia oceanica* en regresión.

El fondo coralígeno estudiado se encuentra en el litoral de Tabernes de la Valldigna, Xeraco y Gandía, entre el Cabo de Cullera y el Cabo de San Antonio, específicamente en la zona de La Vinyeta, accesible con escafandra autónoma (Figura 3-1). Es una costa de deposición con sedimentos de arena y arcilla, dominada por arenas fangosas infralitorales hasta los 40 metros de profundidad, con un gradiente hidrodinámico y batimétrico (Martínez-Baños, 2022). Es posible que la base de esa arena sea de arenisca o de *P. oceanica* muerta (Ballesteros, 2006).

Es una zona impactada por actividades antropogénicas como la pesca menor, de gran importancia, ya que la cofradía de pescadores de Gandía es la que tiene mayor flota destinada a la pesca de arte menor (83'3%) en la Comunidad Valenciana (Calderón, 2018). Durante el muestreo, se encontraron redes y otros restos de material de pesca en el coralígeno. La biodiversidad con especies de alto valor que presenta la zona despierta el interés de los pescadores (Peláez, 2014).

La zona es también impactada por el turismo que genera las playas, que son un destino turístico importante; en verano se llena de turistas y actividades acuáticas, además de tener consecuencias en el consumo de agua y genera contaminación. Los residuos sólidos y aguas residuales se vierten en un emisario submarino a 2 km de la costa y a 17 m de profundidad, encontrado delante del puerto de Gandía. Estos dos factores demuestran no sólo la clase de interacciones que existen en la zona, sino además el interés económico que aporta.

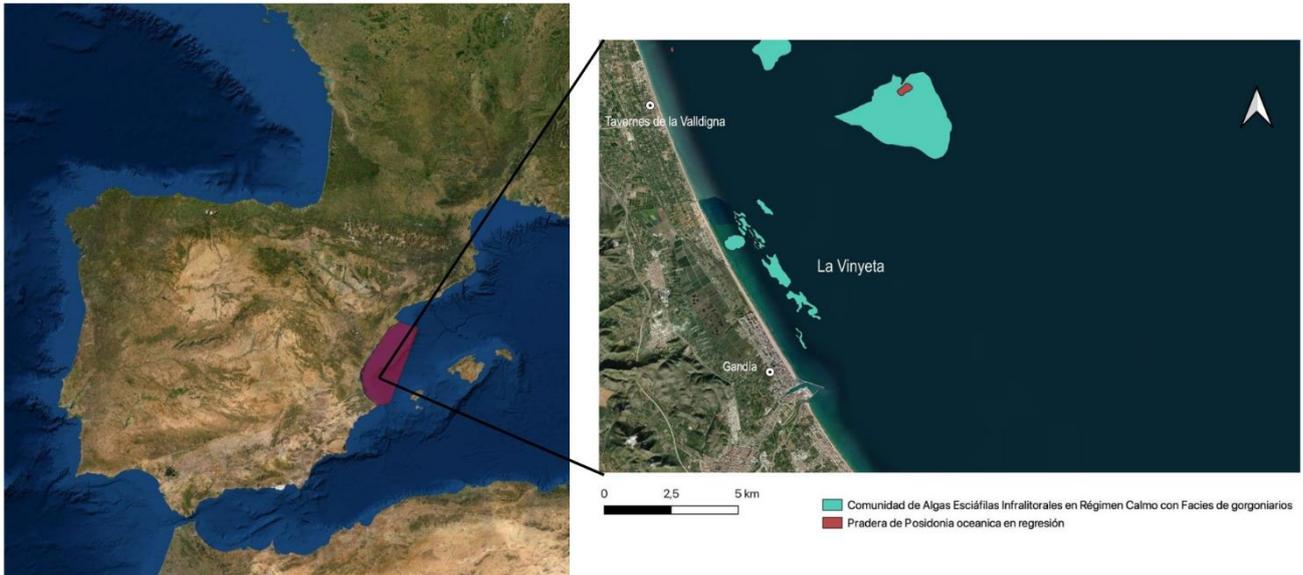


Figura 3-1. Coralígeno de la zona de estudio. (Rodríguez-López et al., 2023)

Este coralígeno, llamado *pedra* por los pescadores artesanales, se encuentra a menos de 2 millas náuticas del puerto de Gandía, a una profundidad de entre 15 y 17'5 metros (Martínez-Baños, 2022). Su altura es de entre 1'5 metros y 3 metros (Peláez, 2014).

Se ha encontrado cierta cantidad de sedimento arenoso enterrando partes del coralígeno (Figura 3-2). El transporte de sedimento ocurre de norte a sur, así que la acumulación mayoritariamente ocurre en el norte de la formación calcárea. Esta zona se encuentra a unos 15 metros de profundidad, y la sedimentación que presenta no es esperable para un oleaje en condiciones normales. Se plantea que la causa pueda estar conectada con el cambio climático y las tormentas extremas que han asolado estas costas en los últimos años.

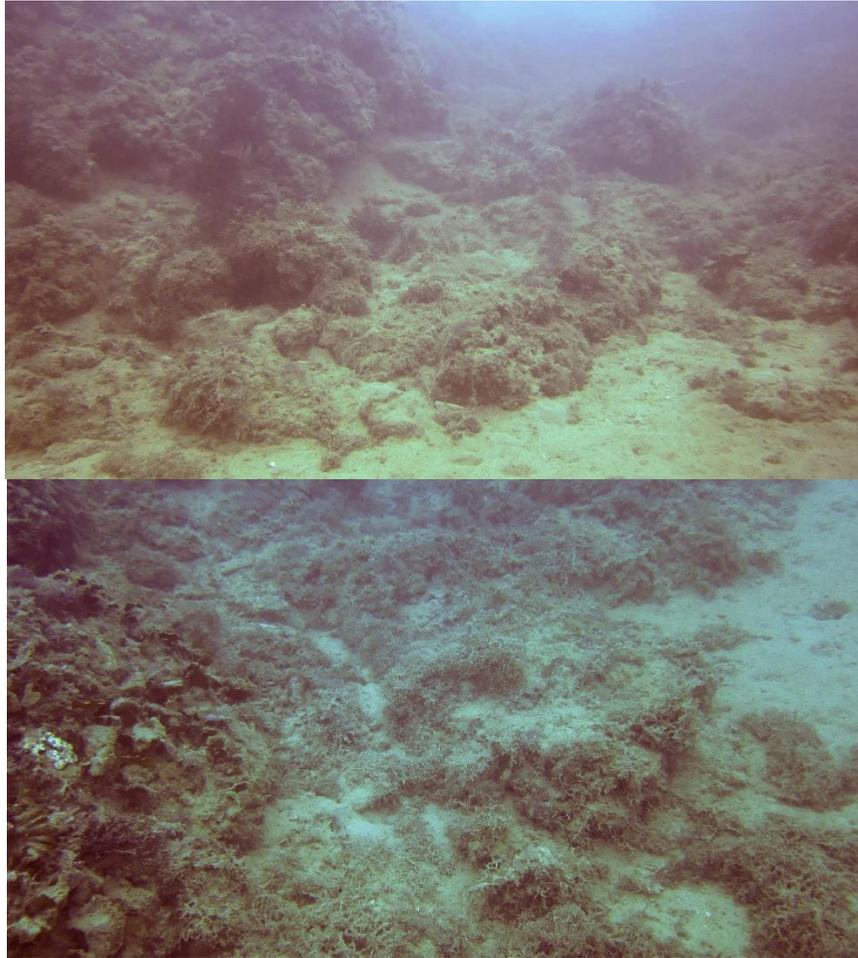


Figura 3-2. Ejemplos de zonas del coralígeno cubiertas de sedimento.

### 3.2. Diseño del muestreo y etapas

El muestreo se hizo buscando aquellas zonas que hubieran sido enterradas bajo sedimento, mediante inmersiones con escafandra autónoma, con un mínimo de dos buceadores más un patrón de embarcación que permanecía en el barco, durante el mes de agosto (Figura 3-3). Se han realizado un total de 9 inmersiones y se recogieron 17 cores (Tabla 3-1). El plan de inmersión se preparó en puntos cartografiados al borde del coralígeno, con un GPS convencional en una boya con cuerda tensa. Alguno de los buceadores llevaba la boya o flotador enganchada gracias a la cuerda y plomos, además de cuatro cores para las muestras y una cámara subacuática para grabar el estado del coralígeno. Gracias a los ordenadores de buceo, se tomó nota de las profundidades alcanzadas y a las cuales se tomaron las muestras. Los recorridos se hicieron dirección norte, manteniendo el coralígeno a la izquierda. En total, se recorrió aproximadamente 1 km.



Figura 3-3. Obtención de una de las muestras de sedimento.

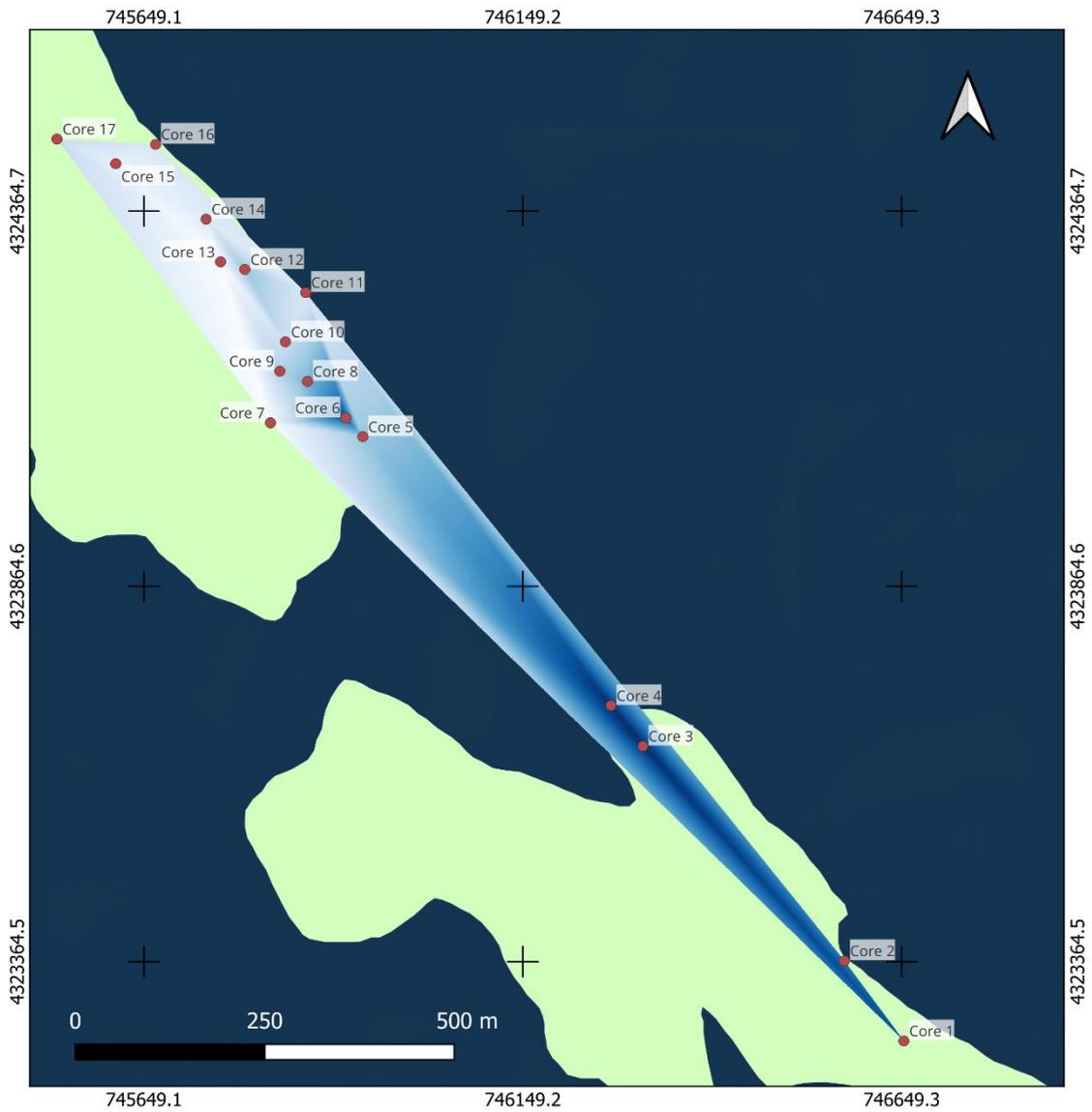
<b>Muestra</b>	<b>Fecha</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
Core 1	18-ago	17'6	39 ° 1,416' N	0° 9,051' W
Core 2	18-ago	17'3	39° 1,475' N	0° 9,103' W
Core 3	03-ago	17'9	39° 1,634' N	0° 9,281' W
Core 4	03-ago	17'9	39° 1,664' N	0° 9,309' W
Core 5	02-ago	16'4	39° 1,863' N	0° 9,528' W
Core 6	02-ago	17'6	39° 1,877' N	0° 9,543' W
Core 7	11-ago	15'4	39° 1,875' N	0° 9,612' W
Core 8	09-ago	16'6	39° 1,904' N	0° 9,577' W
Core 9	11-ago	16'2	39° 1,912' N	0° 9,602' W
Core 10	24-ago	16	39° 1,933' N	0° 9,596' W
Core 11	24-ago	15'8	39° 1,968' N	0° 9,576' W
Core 12	24-ago	16'4	39° 1,986' N	0° 9,631' W
Core 13	24-ago	15'4	39° 1,992' N	0° 9,653' W
Core 14	25-ago	15'7	39° 2,023' N	0° 9,665' W
Core 15	25-ago	15'6	39° 2,065' N	0° 9,746' W
Core 16	26-ago	15'8	39° 2,078' N	0° 9,709' W
Core 17	26-ago	16	39° 2,084' N	0° 9,799' W

Tabla 3-1. Nombres de los cores, sus fechas y la profundidad a la que se tomaron las muestras.

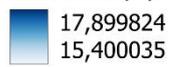
La boya con el GPS convencional enganchado ha permitido cartografiar el borde recorrido total durante las inmersiones gracias a los datos de posicionamiento de los buceadores, y así ver donde se ha recogido cada muestra por tanto de estudiar si hay diferencias de granulometría entre los diferentes puntos y profundidades. El GPS se ha usado para hacer estudios de organismos marinos que no pueden observarse directamente (Sims et al., 2005; Weimerskirch et al., 2005) como alternativa fiable a otros métodos más comerciales, para usarse en zonas pequeñas (Schories y Niedzwiedz, 2012).

En el estudio de Schories y Niedzwiedz (2012) se ha estudiado este método y el error que conlleva. La principal fuente de error es la cantidad adicional de cable entre la boya y la persona buceadora. Por tanto, los resultados no tienen precisión submétrica, pero el error generado es aceptable ya que no sería diferente al error resultante de hacer el mismo estudio encima de una embarcación. El desplazamiento generado en las salidas en condiciones de calma y según la profundidad sería entre 3'2 y 4'6 m, según el estudio de Schories y Niedzwiedz (2012). Durante las inmersiones, se tensó el cable y se ató de tal forma que estuviera lo más recto posible y así minimizar dicho error. Este método ofrece buenos resultados para investigación a aguas poco profundas, y para el presente estudio, cumple con los objetivos. En este caso, para poder mejorar dicho error sustancialmente, sería necesario usar un ecosonda multihaz que no funciona a dicha profundidad y económicamente no se puede asumir.

El mapa del recorrido con los puntos de muestreo y la profundidad puede observarse en la Figura 3-4, donde también muestra una cartografía de las comunidades marinas de algas, que correspondería con el coralígeno. Esta cartografía forma parte del Plan de Ecocartografías del litoral español, llevado a cabo por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, con la participación de las empresas IBERINSA y HIDTMA, que entre 2006 y 2007 cartografiaron las provincias de Alicante y Valencia (Ministerio de la transición ecológica).



Batimetría (m)



Comunidad de Algas Esciáfilas Infralitorales  
en Régimen Calmo con Facies de gorgoniaros



Figura 3-4. Mapa de los muestreos en la zona de estudio con la profundidad medida y la comunidad de algas coralígenas.

En cuanto al trabajo posterior, se realizó un estudio granulométrico de las muestras recogidas. En un análisis granulométrico se estudia el porcentaje de tamaño de grano en muestras de sedimento (Suresh et al., 2012), yendo de micras hasta incluso metros. Para poder clasificar el tamaño de las partículas se usa la escala universal de Udden-Wentworth, donde hay cuatro tipos principales de sedimento, yendo de mayor a menor tamaño: grava, arena, limo y arcilla (Geraldo et al., 2022). Krumbein en 1934 propuso la escala logarítmica de phi ( $\phi$ ) para poder facilitar el uso de la escala anterior, donde  $d$  es el diámetro de la partícula expresada en milímetros (Boggs, 2014).

$$\phi = -\log_2 * d$$

El análisis granulométrico se hizo gracias a un tamizador (Figura 3-5) y una serie de 6 tamices de diferente luz de malla (Figura 3-6): 2000  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$  y 63  $\mu\text{m}$ .

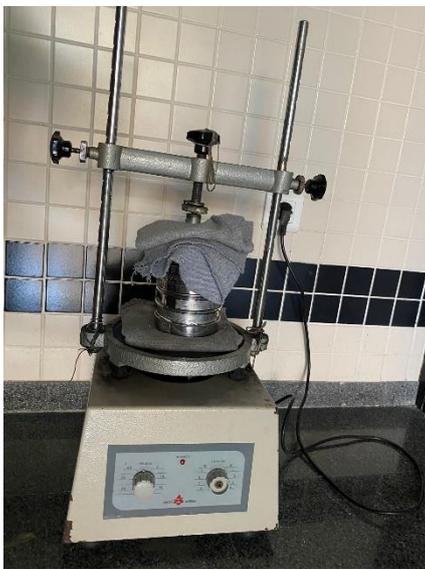


Figura 3-5. Tamizador utilizado para el estudio granulométrico.



Figura 3-6. Tamices usados para el estudio granulométrico.

Para empezar, se dejaban las muestras en una estufa a 100°C por un mínimo de 12 h para secarlas antes de ser procesadas (Figura 3-7). Para facilitar el tamizaje del sedimento, se utilizó un rodillo para separar las agregaciones de los granos formados por la humedad restante, apartando primero restos biogénicos para que no fueran triturados, y añadiéndolos de nuevo para el tamizado, que se hacía colocando los tamices en orden creciente y agregando la muestra en el tamiz superior. El proceso de tamizaje se hizo con tres réplicas por muestra de 100 g cada una. Entre cada una de las réplicas, se limpiaban los tamices para evitar contaminaciones.



Figura 3-7. Muestras de sedimento secándose en la estufa.

El tamizador se ponía en marcha dos para el proceso, en tandas de 20 minutos por réplica, basándose en el procedimiento de Blanes Eckert (2008). Se pesaron los tamices antes y después del tamizaje, y así poder restar la diferencia de los pesos y obtener el peso del sedimento por cada tamiz.

Se introdujeron los datos en el programa de cálculo Gradistat Versión 16.0 (Blott y Pye, 2001). Este programa de análisis del tamaño de grano, realizado en la Universidad de Londres, permite obtener tablas y gráficas gracias al peso del sedimento retenido en los tamices. Se introdujeron los datos en la opción para analizar múltiples muestras y se obtuvieron los parámetros estadísticos siguientes: la media, moda, sorteamiento, asimetría y curtosis. Para completar el estudio estadístico, se ha utilizado el programa Statgraphics y el Microsoft Excel con el objetivo de estudiar la relación entre la profundidad y la latitud con el tamaño de grano y los porcentajes de distintos tipos de arena.

Los parámetros estadísticos escogidos son los obtenidos mediante las fórmulas del método de Folk y Ward (Folk, 1974; Folk y Ward, 1957):

-La media gráfica ( $M_z$ ) sirve para ver realmente el tamaño medio general y es una medida muy estandarizada:

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

-El sorteamiento es también llamado la desviación estándar gráfica inclusiva  $\sigma_I$ , que incluye el 90% de la distribución, y se calcula computando la desviación estándar de  $\phi_{16}$  y  $\phi_{84}$ , y la desviación estándar de  $\phi_5$  y  $\phi_{95}$ , promediándolos juntos:

$$\sigma_I = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

La clasificación del sorteamiento se hace según los siguientes valores:

0'35φ: muy bien sorteado	1'0φ-2'0φ: pobremente sorteado
0'35φ-0'50φ: bien sorteado	2'0φ-4'0φ: muy pobremente sorteado
0'50φ-0'71φ: moderadamente bien sorteado	>4'0φ: extremadamente poco sorteado
0'71φ-1'0φ: moderadamente sorteado	

-La asimetría corresponde a la oblicuidad gráfica inclusiva ( $Sk_I$ ), que incluye el 90% de la curva, y es dada por la siguiente fórmula:

$$Sk_I = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)}$$

-Por último, la curtosis es la medida cuantitativa para calcular la diferencia que tienen los resultados de la normalidad, midiendo la ratio entre el sorteamiento de las puntas de la curva y la de la parte central. Si la parte central está mejor sorteada que las puntas, la curva es excesivamente picuda o leptocúrtica; por otro lado, si las puntas están mejor sorteadas que la parte central, la curva es plana o platicúrtica. Esto se ha medido gracias a la curtosis gráfica ( $K_G$ ):

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2'44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

La clasificación de la curtosis gráfica se hace según los siguientes valores:

<0'67: muy platicúrtica	1'11-1'50: leptocúrtica
0'67-0'90: platicúrtica	1'50-3'00: muy leptocúrtica
0'90-1'11: mesocúrtica	>3'00: extremadamente leptocúrtica

Para poder analizar estadísticamente los porcentajes de arena fina de las muestras, se ha aplicado una transformada de arcoseno, dando resultados en radianes, siguiendo la siguiente fórmula de Excel: =ASENO(RAIZ(valor)). Los valores introducidos eran en tanto por uno.

Una forma de estudiar indirectamente la relación entre las tormentas y el fenómeno de sedimentación es mediante datos de altura de ola histórica. Asumimos una relación indirecta entre la altura y la longitud de onda, que es la que influye en la velocidad de la onda. Como mayor longitud de onda, mayor velocidad de propagación de la onda, y por tanto más afecta al sedimento. Una ola de gran altura debe tener una longitud larga para que sea estable:

$$H = 1/7 \cdot L$$

Según esta relación, si la altura de ola ( $H$ ) llegase a ser mayor que la séptima parte de la longitud ( $L$ ), la ola se rompería (An Open University Course Team, 1989a). Por tanto, una gran altura de una ola que no se rompe tiene una longitud de ola mucho mayor, y si cada vez hay más altura de ola en fenómenos extremos meteorológicos, hay más movilización de sedimento.

En la Figura 3-8 vemos cómo la longitud de onda y el período son de altas magnitudes en olas generadas por tormentas, siendo la longitud superior a los 1000 m y el período a 5 min.

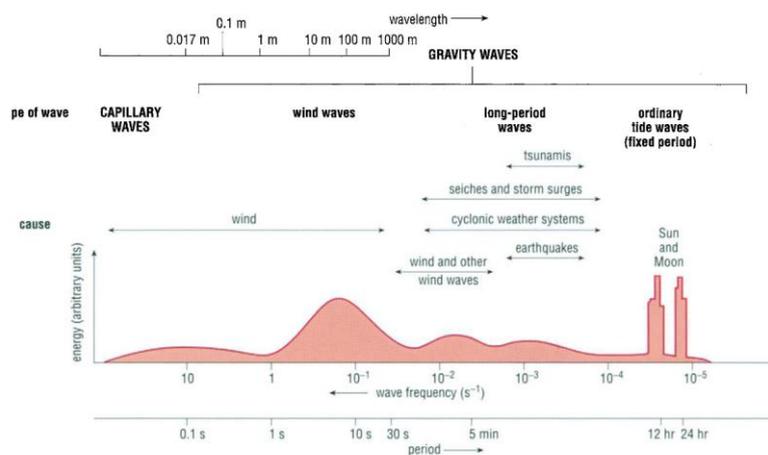


Figura 3-8. Relación entre tipos de ola y periodo, frecuencia, longitud de onda y energía (An Open University Course Team, 1989b).

En tiempos de calma, la acción de las olas puede movilizar el sedimento en profundidades de 10-20 m, en contraste a las olas de tormenta, que pueden llegar a afectar a sedimentos a 200 m de profundidad (An Open University Course Team, 1989a). Por tanto, siendo la profundidad de la zona de estudio de 15-18 m, es posible que el fondo haya sido afectado.

No es posible obtener datos de la longitud de onda durante tormentas directamente, ya que las boyas no miden ese tipo de información. Se necesitaría de satélites que no tienen buena visibilidad durante las tormentas, o mediciones directas en barco en malas condiciones de navegación. Las boyas obtienen alturas de ola predictivas y con ello asumimos esta relación entre altura y longitud.

Por tanto, los datos históricos de altura de ola recopilados pertenecen a una boya en las costas de Gandía, el Punto SIMAR: (2082109), de latitud 39.08°N y longitud 0.17°O, que han sido generados mediante modelos numéricos (Puertos del Estado). Son datos simulados y no proceden de mediciones directas de la naturaleza (Spanish State Ports, 2020). Se han recopilado los datos de altura máxima y mínima semanalmente des de 1980 hasta septiembre 2023, para luego hacer gráficas de los eventos con altura de ola que haya sobrepasado los 2'45 m. De esta forma, es posible estimar si cada vez ha habido más eventos extremos que provoquen mayor altura de ola en las costas valencianas y que puedan estar generando el fenómeno observado del enterramiento.

Para recopilar dichos datos, se creó una aplicación en Python, que recolectó los rangos de fechas requeridos, y los exportó a una hoja de cálculo de Excel. El script puede encontrarse en el Anexo 1.

La aplicación constó de los siguientes componentes:

- Análisis de las peticiones web (usando "Inspect" del navegador", y se documentaron las especificaciones de las peticiones y respuestas, así como las características de los datos retornados por el servidor en formato JSON.
- Configuración de rango de fechas, y la boya a solicitar, para generar un bucle de peticiones y recolectar los datos.

- Simulación de las peticiones, para ser compatibles con las realizadas desde la página de Puertos del Estado. Estas se generaron usando la librería Request, modificando las fechas dentro del rango proporcionado.
- Luego de obtener las respuestas, se exportaron a un archivo XLSX (Excel), mediante la librería XLSXWriter, creada por John McNamara.

## 4. Resultados

Los resultados conseguidos se han diferenciado según si atañe al análisis granulométrico o a la altura de ola y profundidad.

Para empezar, se descartaron los resultados dados por el Core 10 para el análisis estadístico, ya que durante el proceso de tamizaje y en el análisis granulométrico posterior se ha notado que está alterada a causa de la gran cantidad de restos biogénicos que lo componen, provenientes de la erosión del coralígeno. Un ejemplo de esta alteración se observa al realizar una regresión simple entre la profundidad y el tamaño medio  $\phi$ .

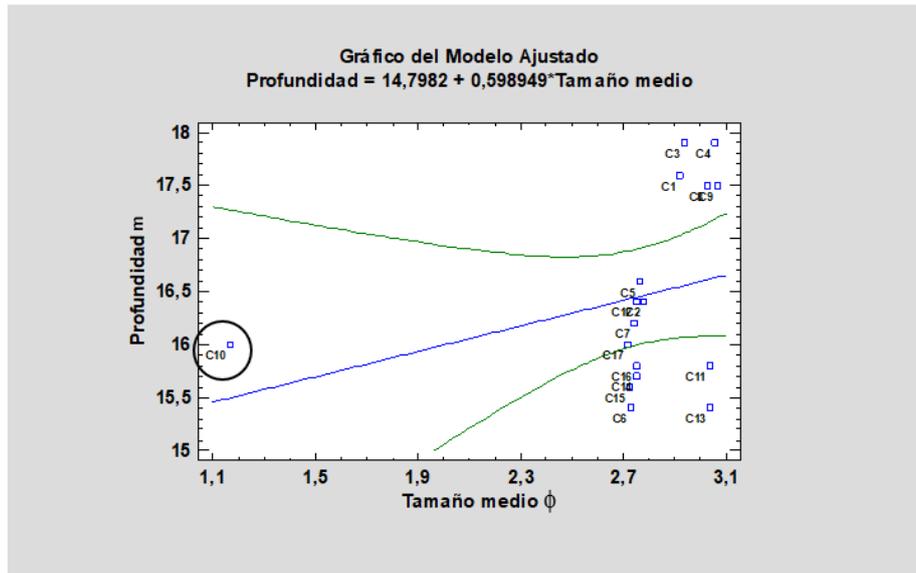


Figura 4-1. Gráfico del modelo ajustado con la profundidad (m) y el tamaño medio ( $\phi$ ) de las muestras. En un círculo está marcado el Core 10.

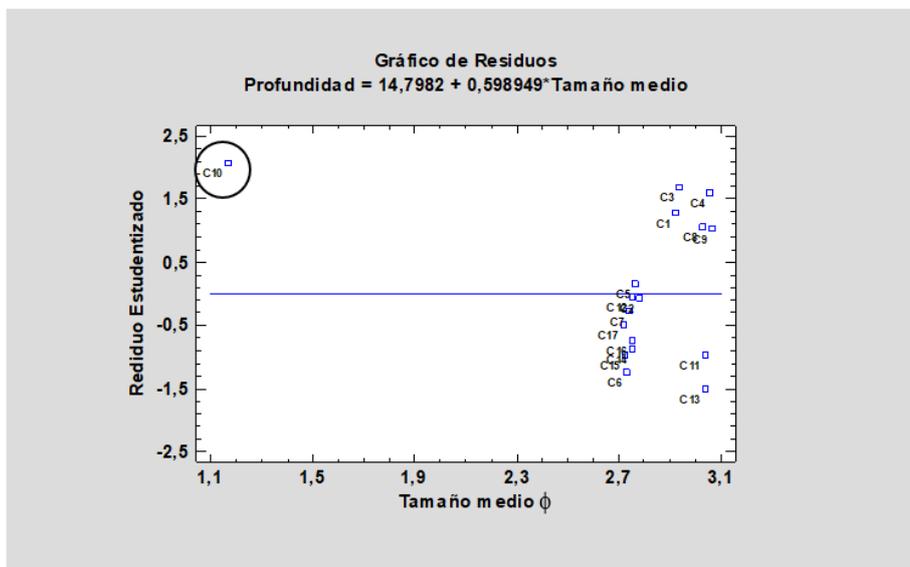


Figura 4-2. Gráfico de residuos estudentizados según la profundidad (m) y el tamaño medio ( $\phi$ ). En un círculo está marcado el Core 10.

Vemos en las Figuras 4-1 y 4-2 cómo el Core 10 tiene un comportamiento muy diferente al resto, teniendo un tamaño medio muy superior a causa del grosor de los restos erosionados.

#### 4.1. Tamaño de grano

Se obtuvo una diversidad de resultados granulométricos que pueden ayudar a idear qué tipo de oleaje y flujo pueden ser capaces de transportar el sedimento que está enterrando el coralígeno. Se ha hecho una clasificación de los granos presentes en las muestras, cosa que se refiere a la uniformidad del tamaño de las partículas.

La relación entre el tamaño  $\phi$  y milímetros, además de la descripción, se obtuvieron gracias a la escala Udden–Wentworth (Folk et al., 1970; Folk, 1954, 1974; Udden, 1914; Wentworth, 1922) (Figura 4-3). El tamaño mínimo medio ( $\phi$ ) es de 3'055 y el máximo es de 2'718, como puede observarse en la Tabla 4-1; por tanto, la mayoría de arena se encuentra entre 0'125 y 0'250 mm.

PARTICLE LENGTH (d <sub>I</sub> )		GRADE	CLASS	FRACTION	
mm	$\phi$			Unlithified	Lithified
4096.0	-12		↑?		
256.0	-8		↑?		
64.0	-6		Gravel	Conglomerate	
4.0	-2	Pebble			
2.0	-1	Granule			
1.0	-0	very coarse	Sand	Sandstone	
0.50	1	coarse			
0.250	2	medium			
0.125	3	fine			
0.063	4	very fine	Silt	Mudstone or Shale	
0.031	5	coarse			
0.015	6	medium			
0.008	7	fine			
0.004	8	very fine	Clay	Mud	
0.002	9				
0.001	10				
0.0005	11				
0.0002	12				
0.0001	13				
			↓?	↓?	

Figura 4-3. Relación entre tamaño de grano y tipo de sedimento. (Blair & McPherson, 1999).

Muestra	Mediana D <sub>50</sub> (φ)	Media (φ)	Sorteamiento (φ)	Asimetría	Curtosis
Core 1	2'816	3'027	0'670	0'235	1'067
Core 2	2'850	3'069	0'995	0'300	1'793
Core 3	2'772	2'936	0'547	0'289	2'424
Core 4	2'844	3'055	0'509	0'535	0'651
Core 5	2'779	2'779	0'312	0'287	1'731
Core 6	2'756	2'919	0'725	0'095	3'525
Core 7	2'732	2'732	0'429	-0'015	2'544
Core 8	2'762	2'762	0'408	0'038	2'426
Core 9	2'744	2'744	0'352	0'048	2'253
Core 11	2'835	3'040	0'504	0'524	0'650
Core 12	2'753	2'753	0'277	0'276	1'645
Core 13	2'827	3'038	0'514	0'535	0'673
Core 14	2'750	2'750	0'286	0'276	1'646
Core 15	2'725	2'725	0'277	-0'282	1'691
Core 16	2'755	2'755	0'427	0'004	2'545
Core 17	2'718	2'718	0'302	-0'299	1'837
<b>Promedio</b>	<b>2'776</b>	<b>2'863</b>	<b>0'471</b>	<b>0'178</b>	<b>1'819</b>

Tabla 4-1. Resultados de los parámetros estadísticos calculados para cada muestra.

En la Tabla 4-2 están las muestras recogidas con sus respectivas descripciones según los resultados del análisis granulométrico mostrado en la Tabla 4-1.

Muestra	Moda (φ)	Media (φ)	Sorteamiento (φ)	Asimetría	Curtosis
Core 1	Bimodal	Arena muy fina	Moderadamente bien sorteado	Bien sesgada	Mesocúrtica
Core 2	Bimodal	Arena muy fina	Moderadamente sorteado	Muy bien sesgada	Muy leptocúrtica
Core 3	Bimodal	Arena fina	Moderadamente bien sorteado	Bien sesgada	Muy leptocúrtica
Core 4	Bimodal	Arena muy fina	Moderadamente bien sorteado	Muy bien sesgada	Muy leptocúrtica
Core 5	Bimodal	Arena fina	Muy bien sorteado	Bien sesgada	Muy leptocúrtica
Core 6	Bimodal	Arena fina	Moderadamente sorteado	Simétrica	Extremadamente leptocúrtica
Core 7	Unimodal	Arena fina	Bien sorteado	Simétrica	Muy leptocúrtica
Core 8	Bimodal	Arena fina	Bien sorteado	Simétrica	Muy leptocúrtica
Core 9	Unimodal	Arena fina	Bien sorteado	Simétrica	Muy leptocúrtica
Core 11	Bimodal	Arena muy fina	Moderadamente bien sorteado	Muy bien sesgada	Muy platicúrtica
Core 12	Unimodal	Arena fina	Muy bien sorteado	Bien sesgada	Muy leptocúrtica
Core 13	Bimodal	Arena muy fina	Moderadamente bien sorteado	Muy bien sesgada	Platicúrtica
Core 14	Unimodal	Arena fina	Muy bien sorteado	Bien sesgada	Muy leptocúrtica
Core 15	Unimodal	Arena fina	Muy bien sorteado	Sesgo grueso	Muy leptocúrtica
Core 16	Bimodal	Arena fina	Bien sorteado	Simétrica	Muy leptocúrtica
Core 17	Unimodal	Arena fina	Muy bien sorteado	Sesgo grueso	Muy leptocúrtica

Tabla 4-2. Descripción de los parámetros estadísticos del análisis granulométrico, a partir del método de Folk y Ward.

En la Tabla 4-3 se muestran los valores resumidos para las muestras. Cabe destacar que, aunque la tabla puede servir para obtener información sobre los sedimentos desplazados en general, no representa los valores de cada muestra y, por tanto, no representa los valores de los extremos. En estos valores generales, vemos que existen dos modas, cosa que no es poco común en sedimentos (Folk, 1974).

Parámetro	Valor ( $\phi$ )	Descripción ( $\phi$ )
<b>Moda 1</b>	2'737	Arenas finas
<b>Moda 2</b>	3'731	Arenas muy finas
<b>Mediana</b>	2'776	Arenas finas
<b>Media</b>	2'863	Arenas finas
<b>Sorteamiento</b>	0'471	Bien sorteadas
<b>Asimetría</b>	0'178	Asimetría fina
<b>Curtosis</b>	1'82	Muy leptocúrtica
<b>Resumen</b>	Resultados bimodales de arenas finas, bien sorteadas, con distribución leptocúrtica y asimetría positiva, sesgada hacia tamaños finos	

Tabla 4-3. Valores y descripciones medios de los resultados del análisis de las muestras.

La Tabla 4-4 muestra los diferentes porcentajes en los cores de distintos tipos de arena, donde la mayoría son de arenas finas.

Muestra	Arenas gruesas (%)	Arenas medianas (%)	Arenas finas (%)	Arenas muy finas (%)
<b>Core 1</b>	4'6	4'7	62'5	24'1
<b>Core 2</b>	3'3	2'5	57'8	26'2
<b>Core 3</b>	2'1	4'3	76'8	16'0
<b>Core 4</b>	0'8	1'1	68'3	26'8
<b>Core 5</b>	0'1	2'0	82'6	14'5
<b>Core 6</b>	5'6	3'3	71'7	15'9
<b>Core 7</b>	1'5	9'7	78'4	9'7
<b>Core 8</b>	1'3	5'0	79'7	13'5
<b>Core 9</b>	1'8	3'1	87'5	7'2
<b>Core 11</b>	1'4	2'2	67'6	27'5
<b>Core 12</b>	0'7	1'4	90'1	7'6
<b>Core 13</b>	1'3	3'0	67'6	24'3
<b>Core 14</b>	2'3	1'2	87'2	8'4
<b>Core 15</b>	2'3	3'1	91'6	2'1
<b>Core 16</b>	2'2	5'4	78'8	13'1
<b>Core 17</b>	0'9	5'6	88'8	2'3

Tabla 4-4. Porcentaje de diferentes tipos de arena encontrados en las muestras.

En el histograma de la Figura 4-4 se muestra claramente el tamaño de grano más característico de las muestras, cosa que también se refleja en la Figura 4-5, donde los valores negativos indica los granos más gruesos. En este diagrama de frecuencias, se ven dos picos, que indicaría el carácter bimodal del sedimento, donde el más alto se corresponde a arena fina, que como se ve en la Tabla 4-4, es la más abundante.

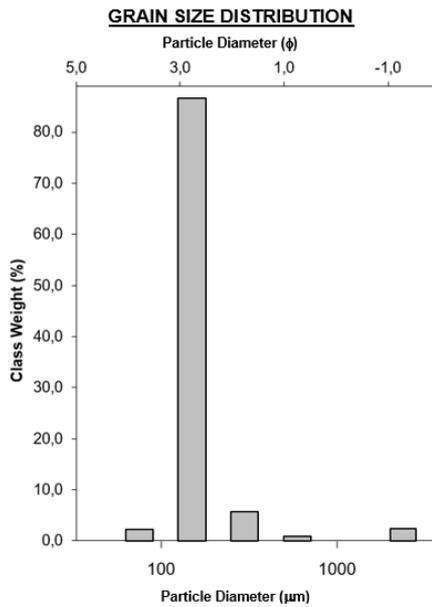


Figura 4-4. Histograma de la distribución del tamaño de grano  $\phi$ .

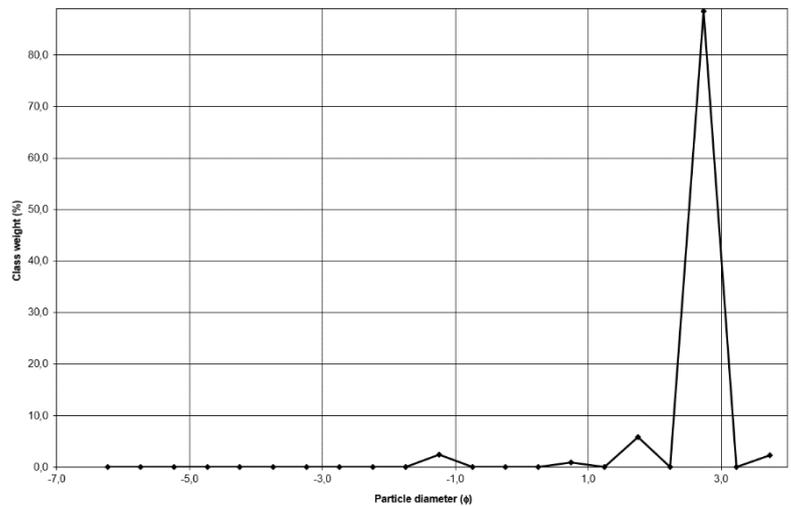


Figura 4-5. Diagrama de frecuencias de la distribución del tamaño de grano  $\phi$ .

En la curva de frecuencias acumulativas (Figura 4-6), el punto más alto corresponde con la moda. En un valor más grande de  $2 \phi$  se encuentra el punto de inflexión y la primera moda ( $2'737$ ), seguida de la segunda ( $3'731$ ).

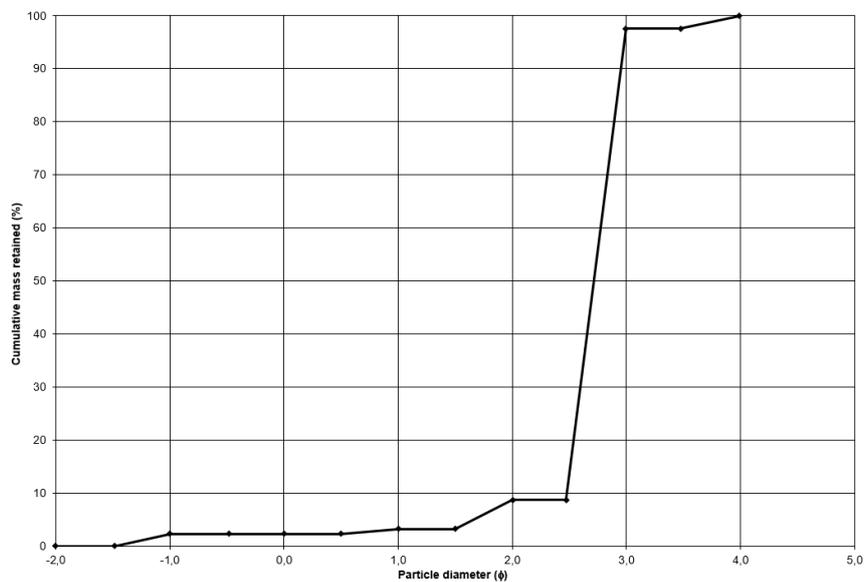


Figura 4-6. Curva de frecuencias acumulativas con el tamaño de grano  $\phi$ .

En la Figura 4-7, vemos que las muestras están formadas de distintos tipos de arena, donde algunas son más finas, moviéndose en el eje del fango. También hay muestras con gravilla, que debe ser a causa del tamaño de los restos biogénicos. En la Figura 4-8 queda claro que la muestra en total es de arena cuando se tiene en cuenta la cantidad de arcilla y limo. Por tanto, aunque en general las muestras son de arenas finas, no son del tipo de sedimento más fino.

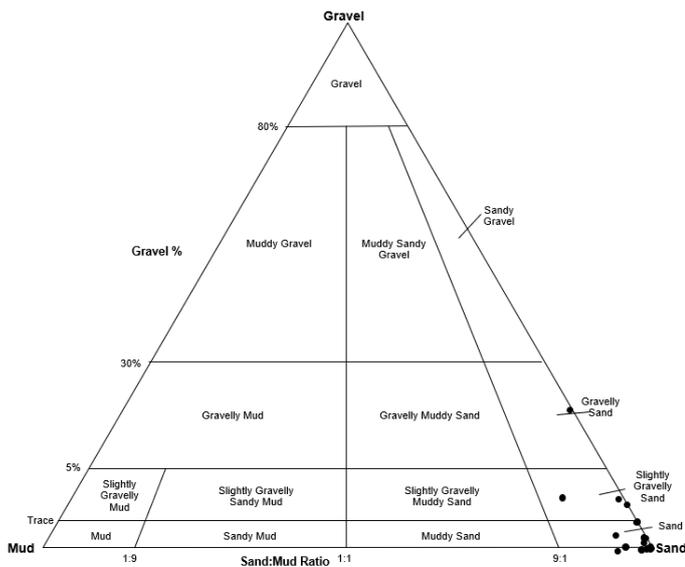


Figura 4-7. Diagrama barro-gravilla-arena de las muestras analizadas. Se observa la predominancia de arenas de distintos tamaños.

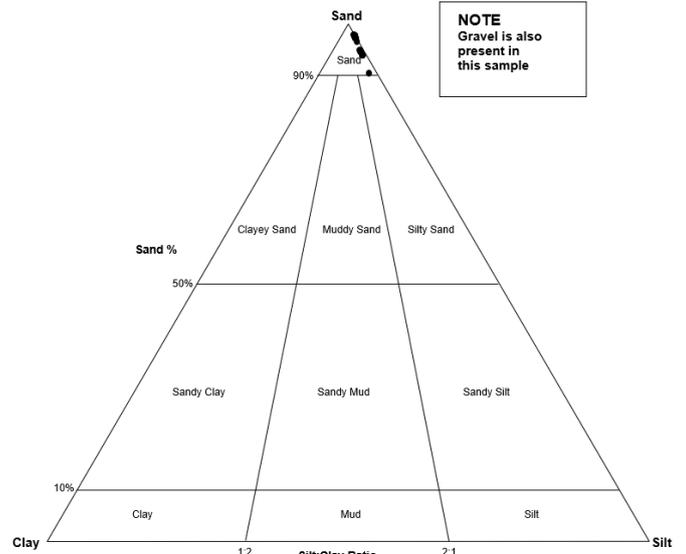


Figura 4-8. Diagrama arena-limo-arcilla de las muestras analizadas. En conjunto, se observa cómo predomina la arena.

En cuanto al análisis de la relación entre las coordenadas geográficas y la profundidad con el tamaño de grano, se ha decidido trabajar con la latitud, que es donde existe mayor variación geográfica dado que la trayectoria del muestreo es mayoritariamente vertical, en el eje N-S; además, se ha trabajado con el tamaño medio de grano y los porcentajes de arena de diferentes tipos en cada una de las muestras. Se han descartado los porcentajes resultantes de sedimento que no fuera arena ya que eran insignificantes.

Al estudiar las relaciones entre las diferentes variables, se ha visto cuáles están correlacionadas de forma estadísticamente significativa con un p-valor menor o igual a 0'05 y cuáles no (Tabla 4-5).

	Latitud	Profundidad
<b>Arenas muy finas (%)</b>	<b>0'0099</b>	0'1275
<b>Arenas finas (%)</b>	<b>0'0020</b>	0'0653
<b>Arenas medianas (%)</b>	0'9012	0'8146
<b>Arenas gruesas (%)</b>	0'1145	0'1647
<b>Tamaño medio <math>\phi</math></b>	<b>0'0053</b>	<b>0'0411</b>

Tabla 4-5. Resultados del p-valor del estudio de las relaciones entre las variables. Los valores marcados son estadísticamente significativos.

Como podemos observar, las arenas gruesas y medianas no están correlacionadas significativamente ni con la latitud ni con la profundidad. En cambio, el tamaño medio sí presenta esta correlación con las dos variables. La arena fina y la muy fina están correlacionadas con la latitud, pero no con la profundidad. Por otro lado, la profundidad y la latitud están correlacionadas entre sí.

Aunque las correlaciones entre las arenas finas y muy finas con la profundidad no son estadísticamente significativas según el criterio implementado, existe una relación entre las variables. En el caso de las arenas finas, el p-valor es de 0'06, bastante cerca de 0'05, y por tanto tiene un nivel de confianza del 94%, que sigue siendo un porcentaje bastante alto. En cuanto a las arenas muy finas, el nivel de confianza es más bajo, de

88%, pero sigue siendo relativamente alto, dando a entender que puede haber cierta relación entre las variables.

A continuación, se muestran las gráficas de las variables con correlaciones estadísticamente significativas, que son aquellas que pueden explicar el fenómeno de sedimentación.

En las Figuras 4-9, 4-10, y 4-11 observamos el comportamiento del porcentaje de arenas muy finas, finas y del tamaño medio de las muestras con la latitud. Hay mayor porcentaje de arenas muy finas a menores latitudes, hacia el sur, mientras que la arena fina tiene el comportamiento contrario, con mayores porcentajes de ésta en el norte. Con el tamaño medio, y teniendo en cuenta que la numeración de las muestras va en sentido sur-norte, observamos un grupo de altas latitudes y tamaños más gruesos diferenciado del resto de las muestras.

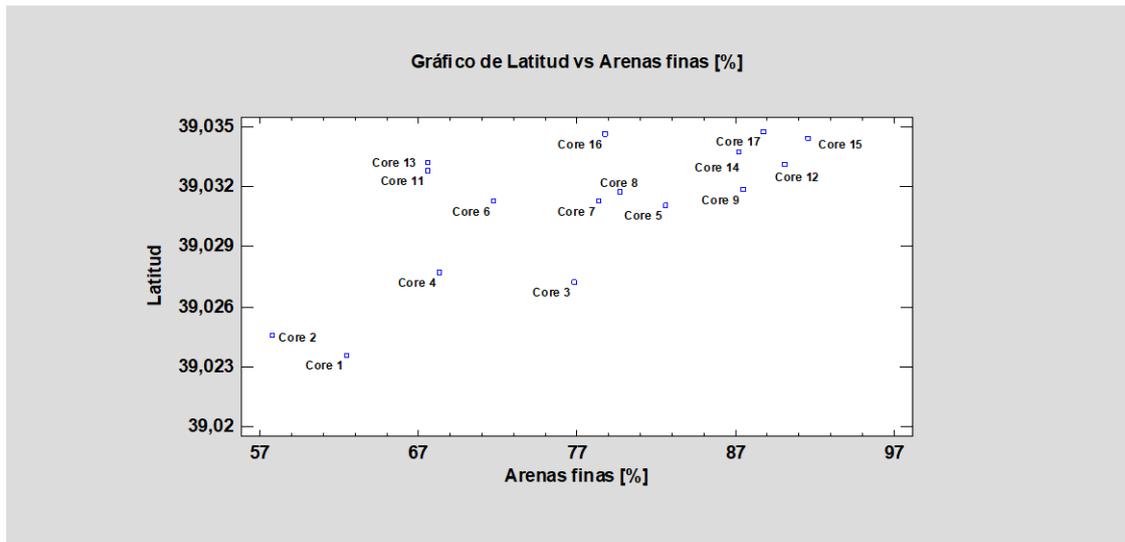


Figura 4-9. Gráfico con la latitud y el porcentaje de arenas finas de las muestras.

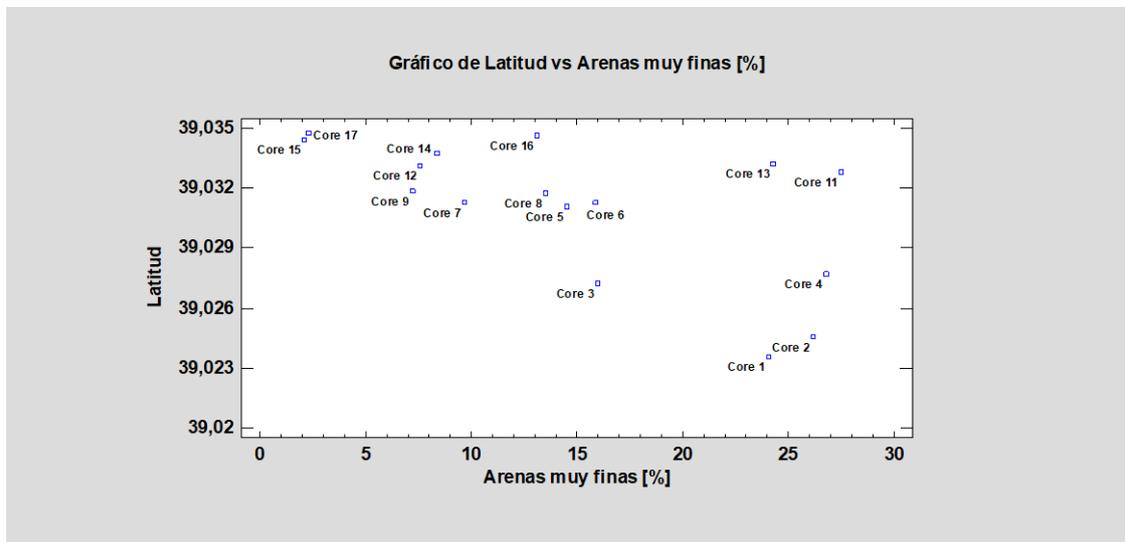


Figura 4-10. Gráfica de la latitud y el porcentaje de arenas muy finas de las muestras.

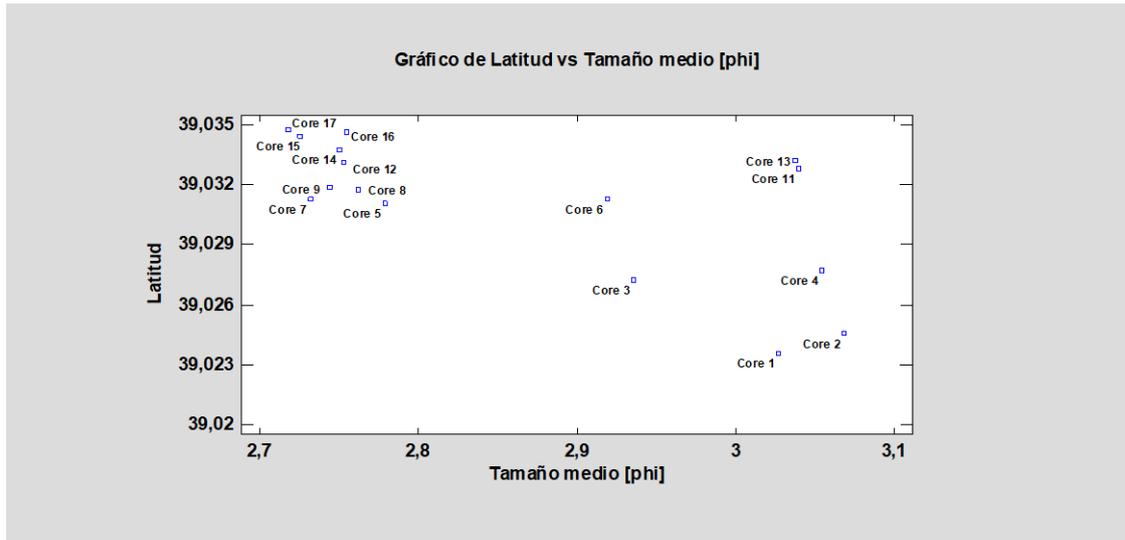


Figura 4-11. Gráfica de la latitud y el tamaño medio de grano de las muestras, donde el tamaño medio  $\phi$  de 2 es equivalente a  $250 \mu\text{m}$  y el de 3 a  $125 \mu\text{m}$ .

En las Figuras 4-12, 4-13 y 4-14 encontramos los modelos ajustados de estas variables. En estos modelos se observa el comportamiento descrito en las anteriores gráficas, además del ajuste de cada muestra. El comportamiento de la arena fina y muy fina son opuestos en relación con la latitud, y el tamaño medio tiene un comportamiento más similar al de las arenas muy finas.

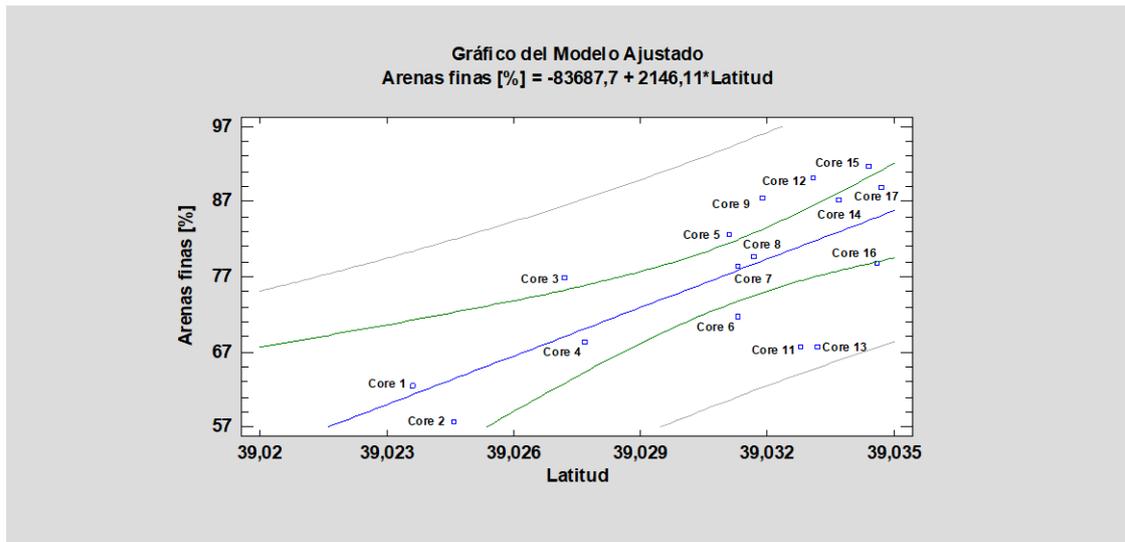


Figura 4-12. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas finas y la latitud.

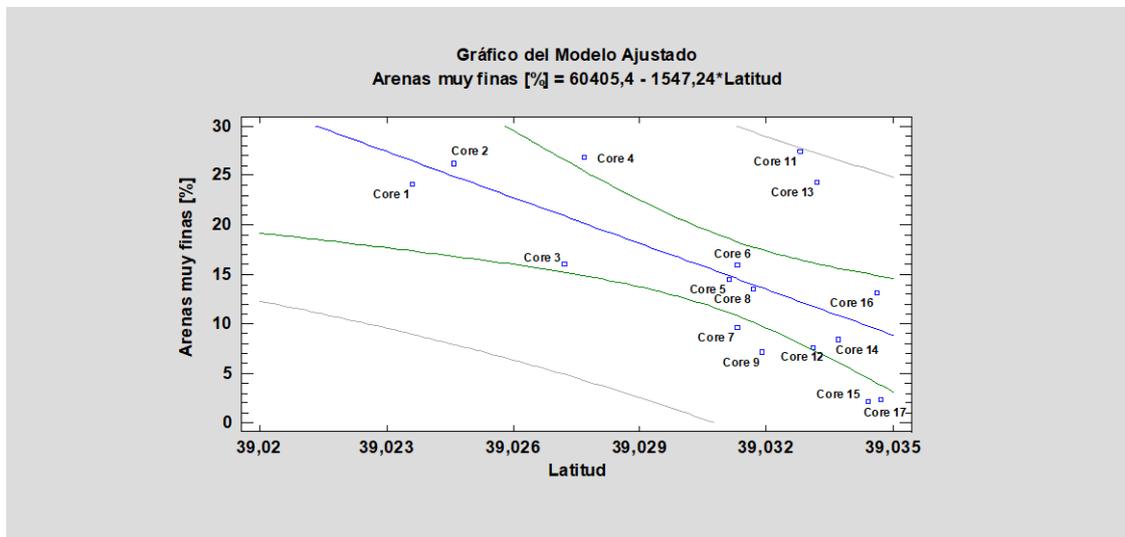


Figura 4-13. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas muy finas y la latitud.

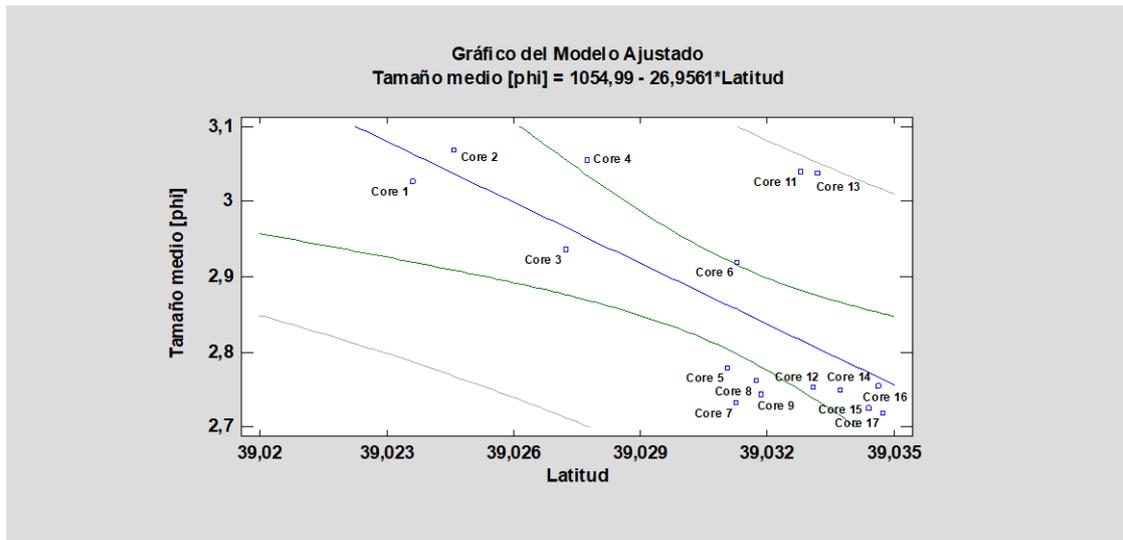


Figura 4-14. Gráfica del modelo ajustado del tamaño medio de grano de las muestras y la latitud, donde el tamaño medio  $\phi$  de 2 es equivalente a  $250 \mu\text{m}$  y el de 3 a  $125 \mu\text{m}$ .

En cuanto a la relación con la profundidad, se tiene en cuenta principalmente el tamaño medio de los granos (Figuras 4-15 y 4-16). Entre los 15'5 y 17 metros de profundidad, hay diversas muestras que presentan un mayor tamaño de grano, que se corresponde a aproximadamente las muestras de la zona norte. Otras tienen menor tamaño de grano a mayores profundidades, aproximándose a los 18 metros.

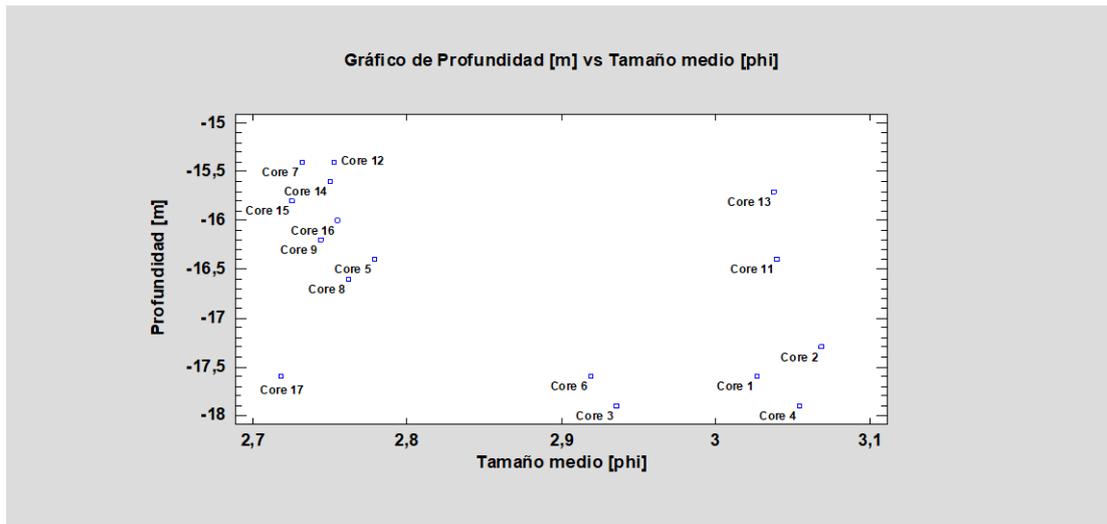


Figura 4-15. Gráfica de la profundidad y el tamaño medio de grano las muestras, donde el tamaño medio  $\phi$  de 2 es equivalente a 250  $\mu\text{m}$  y el de 3 a 125  $\mu\text{m}$ .

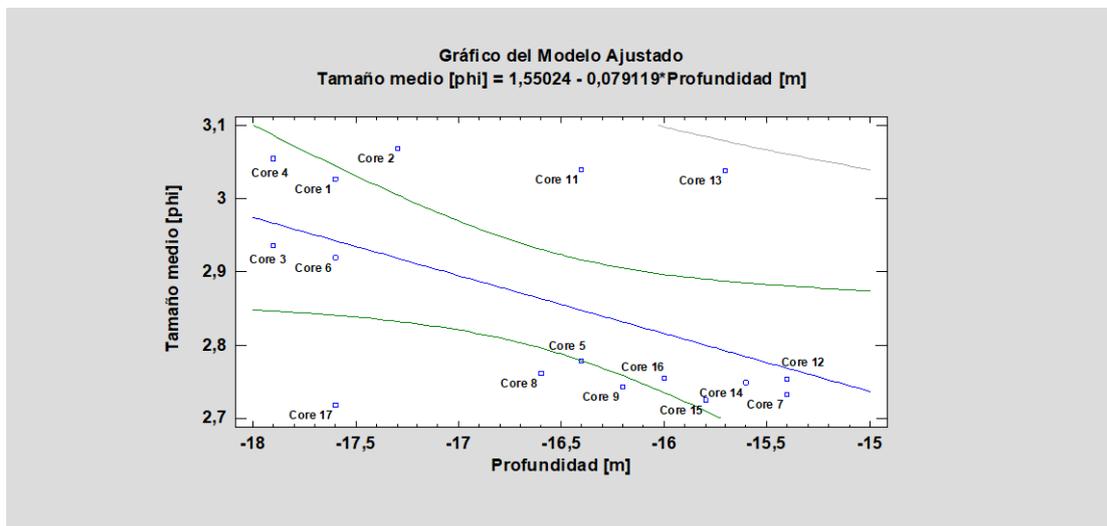


Figura 4-16. Gráfica del modelo ajustado de la profundidad y el tamaño medio de grano de las muestras, donde el tamaño medio  $\phi$  de 2 es equivalente a 250  $\mu\text{m}$  y el de 3 a 125  $\mu\text{m}$ .

Aunque no presentan una correlación estadísticamente significativa con la profundidad, puede ser interesante añadir los modelos ajustados con el porcentaje de arena fina y muy fina dados los resultados de la Tabla 4-5. En las Figuras 4-17 y 4-18, aunque estas correlaciones tienen un p-valor mayor a 0'05, se observan tendencias similares a las de las Figuras 4-12 y 4-13.

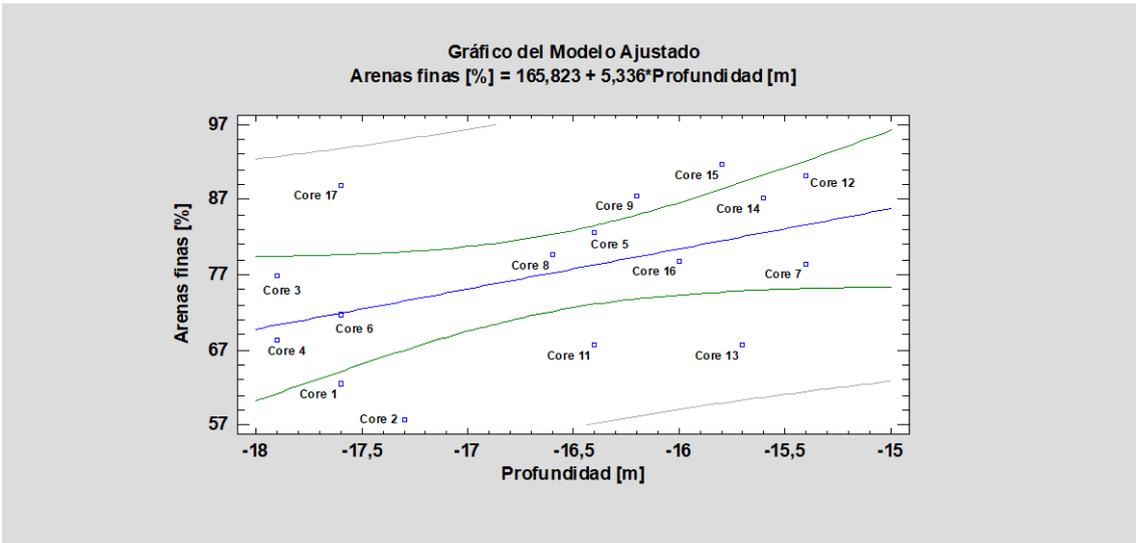


Figura 4-17. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas finas y la profundidad.

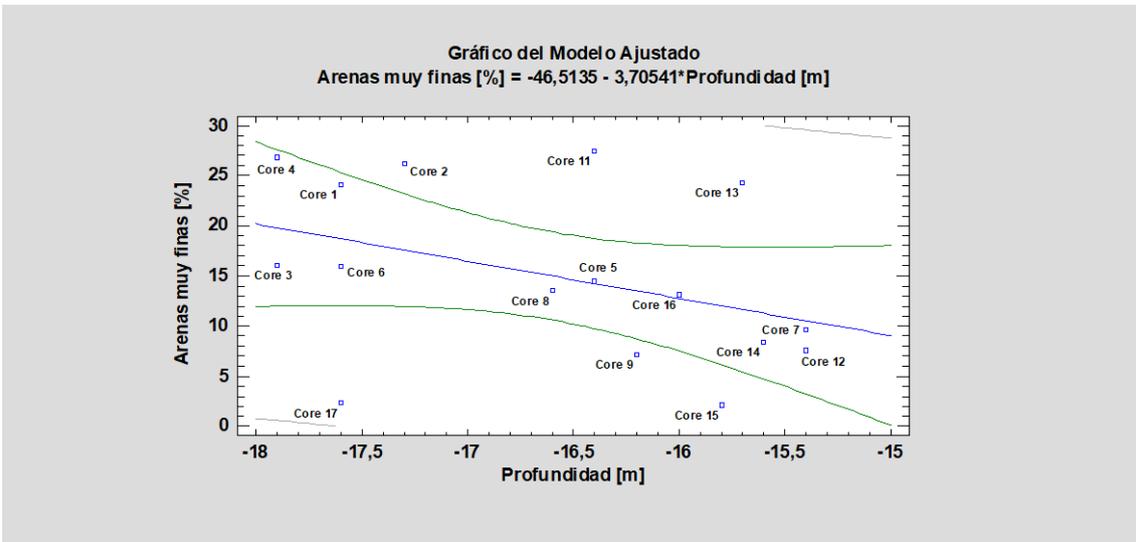


Figura 4-18. Gráfica del modelo ajustado del porcentaje de arenas muy finas y la profundidad.

También se ha realizado un análisis de conglomerados según los porcentajes de arenas muy finas y finas con el método del vecino más cercano (Figura 4-19).

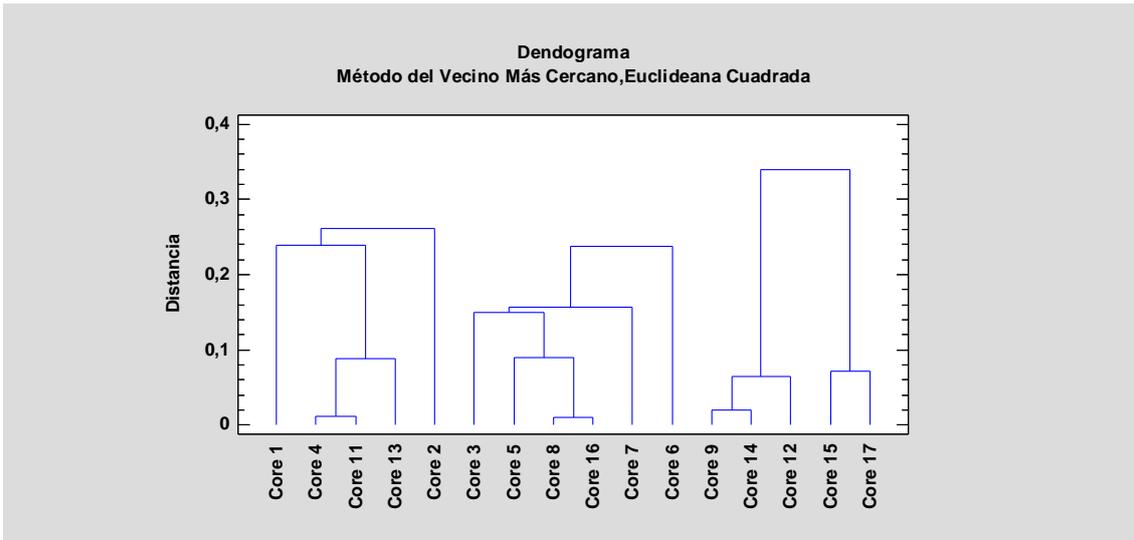


Figura 4-19. Dendrograma resultante del análisis de conglomerados con el método del vecino más cercano y euclídeana cuadrada.

Vemos que se diferencian tres grupos principales. En la Tabla 4-6, vemos los porcentajes correspondientes de cada tipo de arena según los grupos formados. El grupo 1 es el que tiene mayor porcentaje de arenas muy finas, mientras que el grupo 3 es el que tiene mayor porcentaje de arenas finas. Observando la numeración de las muestras en la Figura 4-19, vemos que las muestras del grupo 1 se corresponden con algunas muestras encontradas en el sur. En el grupo 3 se encuentran muestras del norte.

Conglomerado	Arenas finas [%]	Arenas muy finas [%]
1	64'76	25'78
2	78'0	13'7833
3	89'04	5'52

Tabla 4-6. Grupos formados en el análisis de conglomerados y los porcentajes correspondientes de arenas finas y muy finas.

#### 4.2. Altura de ola y tormentas

Se han representado la altura de ola de los datos históricos a partir de los 2'45 metros tomando en cuenta la escala Douglas (AEMET), donde a partir de esa altura se clasifica el oleaje como mar gruesa, en la categoría 5 de un total de 9. De esta forma, se descartan las alturas más pequeñas y se centran los resultados en un rango donde es más posible que el oleaje afecte al coralígeno.

En la gráfica resultante (Figura 4-20) se observa un crecimiento en el número de eventos meteorológicos donde la altura de ola supera los 2'45 metros. Además, también hay cierta tendencia al crecimiento en la Figura 4-21, que muestra la altura de ola máxima a lo largo de los años estudiados.

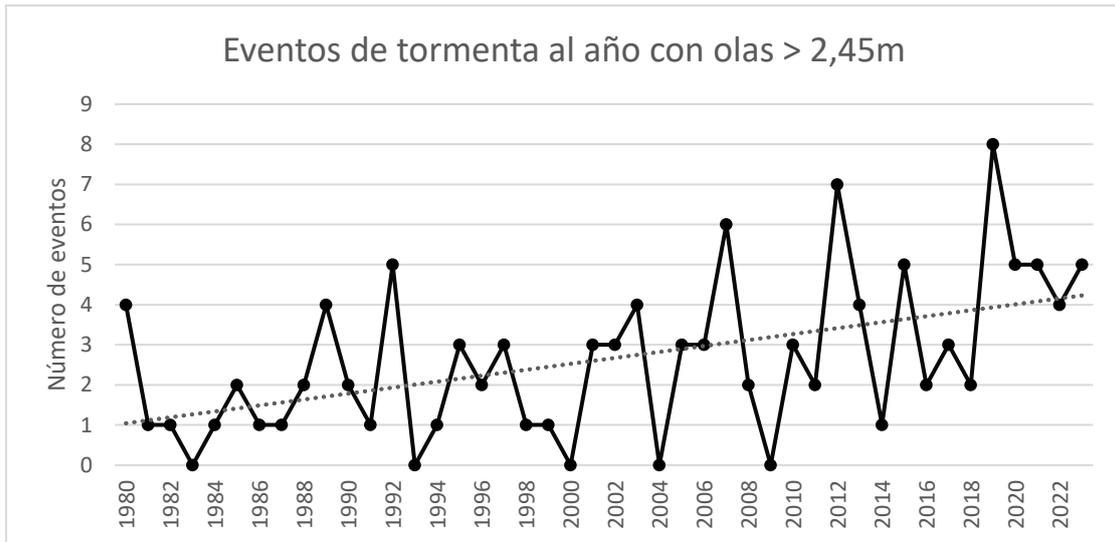


Figura 4-20. Número de eventos de tormenta con olas mayores a 2'45 metros al año en la costa de Gandía, entre 1980 y 2023.

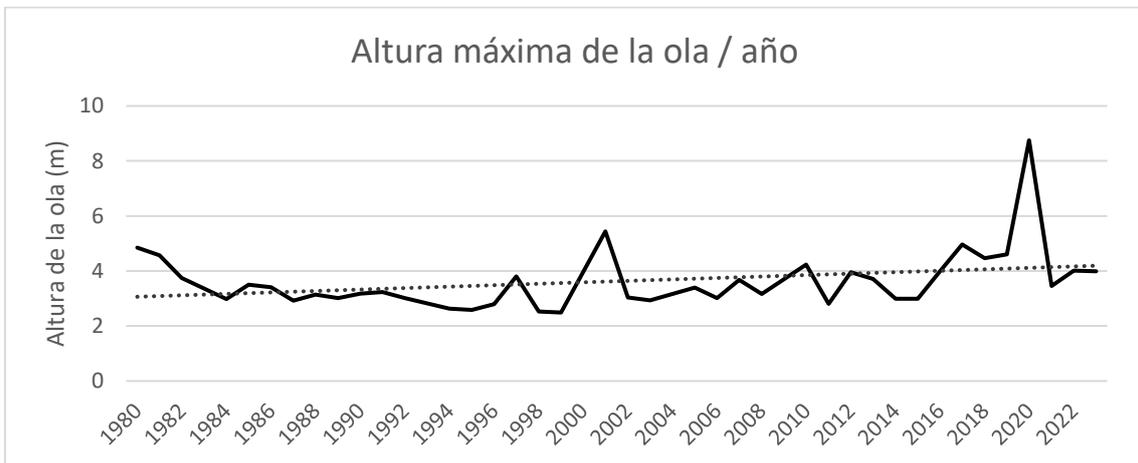


Figura 4-21. Altura máxima de las olas en la costa de Gandía al año, entre 1980 y 2023.

## 5. Discusión

A continuación, se desarrolla la discusión a raíz de los resultados presentados en el apartado anterior.

En los resultados (Tablas 4-2 y 4-3) vemos que la mayoría de las muestras son bimodales, cosa que puede relacionarse con las tormentas, ya que indica velocidades distintas y un aporte sedimentario diferente. En el estudio de Geraldo et al. (2022), se encontró que la distribución bimodal por distintos aportes implica la existencia de diferentes ambientes deposicionales, incluso si tienen características similares. En consecuencia, la arena estudiada podría provenir de diferentes lugares y que acabase depositada en la zona de estudio por las tormentas.

En cuanto a los porcentajes de arena (Tabla 4-4), vemos que la mayoría de los sedimentos se catalogan en arenas finas. En el análisis de correlaciones (Tabla 4-5) se indica que el porcentaje de arenas finas y muy finas tienen una correlación estadísticamente significativa con la latitud, mientras que las arenas medianas y gruesas no. El material transportado proviene de fondos con la granulometría dominada por las arenas muy finas y finas, y no por arenas gruesas que podemos encontrar en zonas de playas. Por otro lado, el tamaño medio tiene una relación estadísticamente significativa con la profundidad y la latitud.

Por tanto, al ver la distribución de cada tipo de arena de esta zona, los resultados (Figura 4-12) indican que el porcentaje de arena fina es mayor en el norte, mientras que las arenas muy finas (Figura 4-13) lo son en el sur, teniendo en cuenta su disposición en el mapa (Figura 3-4). El tamaño medio muestra una tendencia similar (Figura 4-14). Esto indica que el tamaño de grano más grueso se encuentra en el norte, relacionándose con la dirección de los temporales y de las corrientes; como más grueso el sedimento, mayor energía de la corriente se necesita para transportarlo, y por eso el sedimento es más grueso al norte. Aunque no todas las muestras se ajustan de igual forma en los modelos ajustados, éstos sirven para describir estas tendencias.

La profundidad está correlacionada estadísticamente con la latitud con un p-valor de 0'0089, correspondiéndose a que más al norte la profundidad es más somera. Las figuras que muestran la relación entre las variables y la profundidad (Figuras 4-15 hasta 4-18) presentan tendencias similares a las de la latitud (Figuras 4-12 hasta 4-14), aunque los porcentajes de arenas finas y muy finas tienen una correlación no estadísticamente significativa con la profundidad, pero con un porcentaje de confianza relativamente alto.

El temporal Gloria presentaba una dirección noreste (Canals & Miranda, 2020), con lo cual la arena transportada a raíz del temporal se acumularía principalmente en la zona del norte del coralígeno. Es, además, donde se ha encontrado más enterramiento en la inspección visual durante las inmersiones para el muestreo. La zona noroccidental del Mediterráneo se caracteriza por los vientos predominantes que provienen del noroeste (*Mestral*) y del norte (*Tramuntana*), que pueden extenderse por cientos de kilómetros (*fetch*), atrayendo aire seco y frío, y son una de las principales causas de tormenta en este mar entre Italia y las islas Baleares (Flamant et al., 2003), donde además también actúa el viento de Levante, en dirección este (Bolaños, 2004). Estas características explican que la acumulación de sedimento se haga mayoritariamente en la zona norte del coralígeno; la orientación del coralígeno y de las tormentas influyen en qué zonas serán enterradas.

La evolución de la altura de ola entre 1980 y 2023 muestra la tendencia creciente de la frecuencia de eventos de tormenta, donde la altura de ola superaría los 2'45 m. Existe además cierta inclinación a que esta altura de la ola crezca, y es de esperar que haya cada vez más enterramiento en la zona del coralígeno a medida que haya más tormentas y con mayor altura de ola. Además, con el aumento de eventos extremos, es posible que aumente el área de afectación de la sedimentación.

En estudios sobre la tendencia de tormentas extremas y su relación con el cambio climático en las costas del Mediterráneo oeste (Amarouche & Akpınar, 2021; Portillo Juan et al., 2022), se llega a la conclusión de que la zona tiene un alto riesgo de volver a sufrir eventos extremos como fue el Gloria, tendencia que concuerda con los resultados de este estudio. La altura de ola se verá afectada con fenómenos como el incremento del nivel del mar, que aumentará la profundidad y la velocidad del viento. Estos cambios dependen de las condiciones futuras según el escenario RCP de cambio climático que acabe ocurriendo, donde la magnitud de factores como la radiación solar con la evaporación y sequías será diferente (Mösso et al., 2020).

Durante las inmersiones, se observó una pendiente hacia el borde del coralígeno, donde probablemente el flujo se acelera al existir una reducción de la sección, provocando un fenómeno de excavación además de la sedimentación. Hacia el norte, la zona es más somera y presenta bastante enterramiento, posiblemente debido a una mayor afectación del oleaje a causa de una menor profundidad. En la Figura 5-1 se ejemplifica el enterramiento que sufre el coralígeno.



Figura 5-1. a) Imagen de antes de una parte del coralígeno. b) y c) son imágenes de después, donde las algas calcáreas han quedado tapadas por la arena.

Este enterramiento limita la cantidad de luz que reciben las algas, afectando su metabolismo, y pueden acabar muriendo. El efecto de la sedimentación también influye en los organismos que necesitan de estas estructuras para sobrevivir y alimentarse, provocando consecuencias en todo este ecosistema, y por tanto también a las especies de interés pesquero que dependan de esta zona, como el mero y la langosta, que además están siendo sobreexplotadas. Además, la zona que está siendo enterrada es el borde, donde según Rodríguez-López (2020) es precisamente la zona con mayor biodiversidad. Es de esperar que, a medida que ocurran más tormentas, más impacto habrá en este hábitat y las especies que dependen de él. Algunos estudios que han estudiado este fenómeno, por un lado, causado por obras de construcción (Rogers, 1990) y por otro, realizando experimentos con fanerógamas marinas y sedimentación (Cabaço et al. 2008), observan que impacta negativamente a las poblaciones de fanerógamas por la falta de zonas fotosintéticas y por la turbidez.

Teniendo el tamaño de grano de las muestras, gracias a la Figura 5-2 se puede saber de manera simplificada qué velocidad de corriente es necesaria para levantar la arena.

Las muestras de arena tienen un tamaño medio entre 0'250 y 0'125 mm, así que con una corriente de más de 1 cm/s sería suficiente para que los granos sean transportados. Si la velocidad incrementa, las partículas pueden acabar siendo erosionadas. La erosión también afectaría al coralígeno, fenómeno observado en las inmersiones, al notar el material biogénico acumulado en sus bordes.

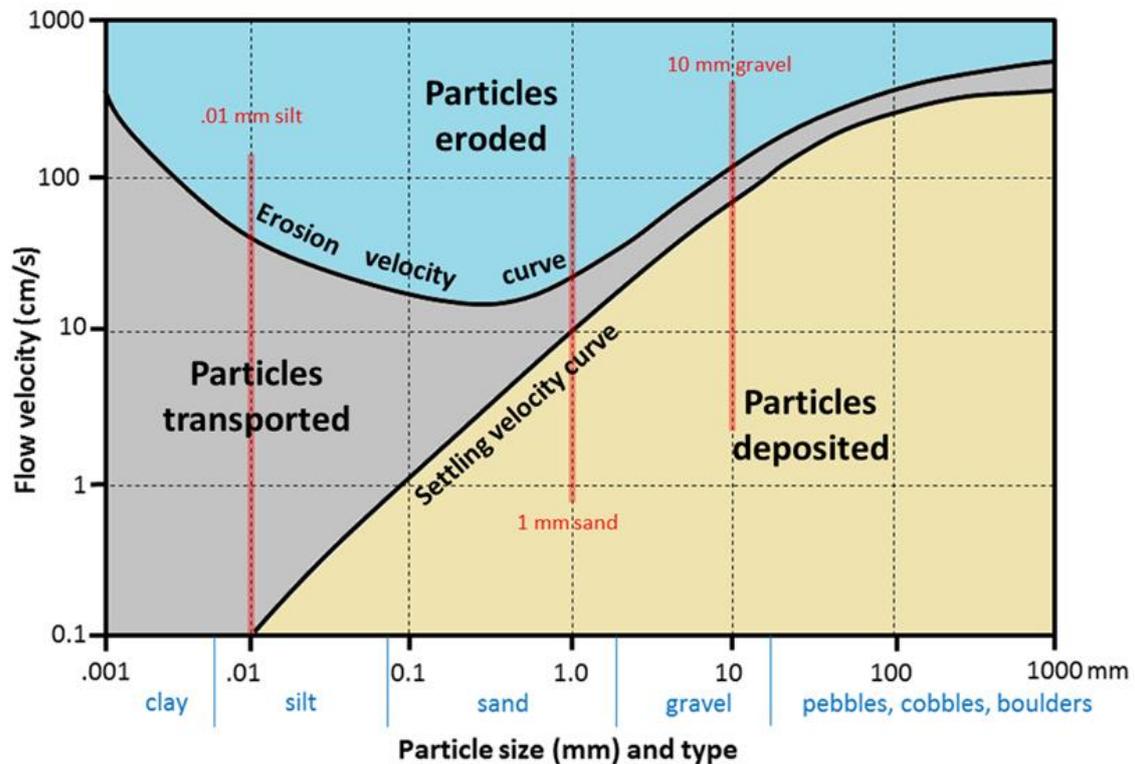


Figura 5-2. Diagrama Hjulström-Sundborg con las relaciones entre el tamaño de la partícula y la velocidad de las corrientes, donde las partículas pueden ser transportadas, erosionadas o depositadas (Earle, 2015).

Al comparar los puntos de muestreo con la cartografía disponible de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar del coralígeno (Figura 3-4), se observa que no corresponde con el fondo estudiado, causado por poca precisión o incluso por el propio fenómeno de enterramiento y erosión, que haya ocasionado un cambio en los límites del coralígeno. Ocurre algo similar con las medidas de profundidad, que al comparar las profundidades tomadas en el muestreo (Tabla 3-1) y las cartografiadas en la Figura 5-3, las profundidades tomadas son generalmente más profundas que de dicha cartografía. Esto puede ser por la erosión y cambio de los bordes del coralígeno debido al enterramiento y a las corrientes que lo generan. Los bordes actuales del coralígeno, a causa de este fenómeno, no coinciden ni en forma ni en profundidad. La pendiente generada por la aceleración de las corrientes, mencionada anteriormente, puede estar contribuyendo a esta mayor profundidad medida.

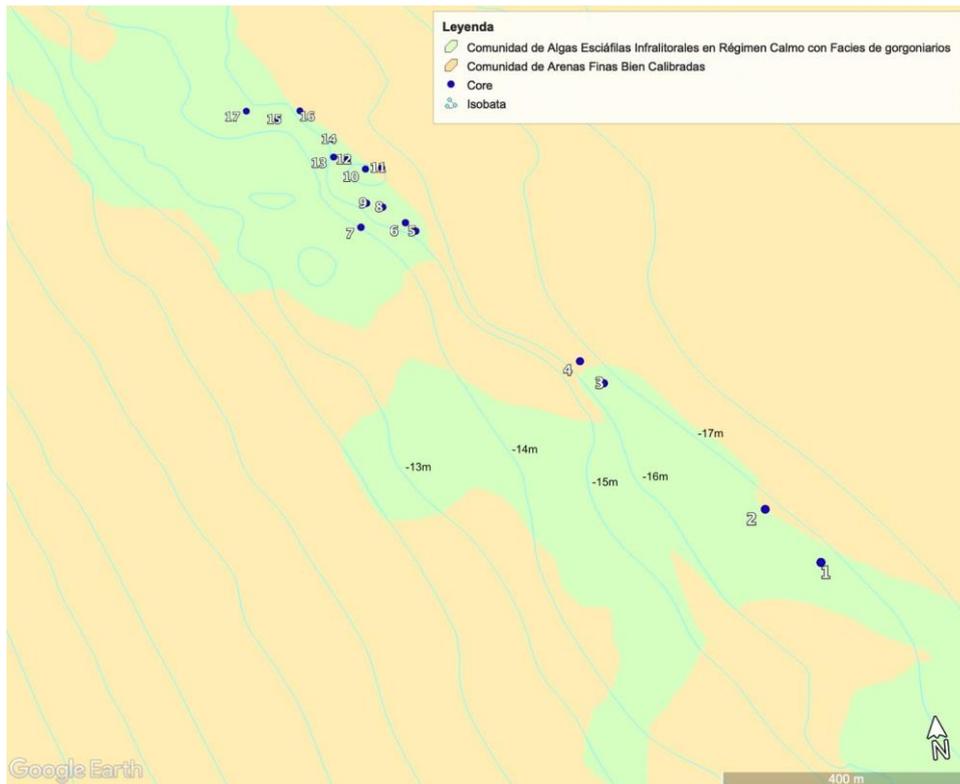


Figura 5-3. Mapa de las muestras y profundidades cartografiadas por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar.

Al fijarse en las variables estadísticas de las Tablas 4-1, 4-2 y 4-3, vemos que los valores centrales de tamaño de grano están mejor sorteados que los extremos gracias a los resultados de curtosis que, además, si presenta un valor grande indica que en las muestras existe un tamaño predominante (Geraldo et al., 2022). En cuanto a la asimetría, la asimetría general es positiva y por tanto sesgada hacia los sedimentos finos, cosa que tiene sentido ya que es una zona donde predomina la arena, como observamos en las Figuras 4-4, 4-5 y 4-6, con picos en el tamaño 2'737, además de las Figuras 4-7 y 4-8. No obstante, en tres muestras se observa una asimetría negativa (Tabla 4-1): en el Core 7, Core 15 y Core 17, que son muestras sesgadas hacia gruesos. Estas tres muestras son de las pocas que son unimodales, con una moda de arena fina. De estas tres, el Core 15 es la que muestra mayor porcentaje de arenas gruesas (2'3%).

En el análisis de conglomerados de la Figura 4-17, algunas de las muestras con menor distancia entre ellas no son cercanas geográficamente, como es el caso del Core 4 y el 11, el Core 8 y el 16, y el Core 9 y el 14. Los grupos formados que muestran el dendograma tampoco corresponden totalmente a las zonas geográficas, salvo el grupo 3 donde en su mayoría las muestras se encuentran en la zona norte y presentan un alto porcentaje de arenas finas (Tabla 4-6). Hay que tener en cuenta que este dendograma sólo representa las distancias teniendo en cuenta los porcentajes de arenas finas y muy finas. Las muestras con menor distancia entre ellas tienen un porcentaje diferente de arenas gruesas (Tabla 4-4), donde el Core 11 casi dobla en valor al Core 4, el Core 16 casi lo dobla respecto al Core 8, y entre el Core 9 y el Core 14 también hay una diferencia. Este análisis de conglomerados sirve para reafirmar los resultados obtenidos para la zona norte del coralígeno estudiado, donde existe mayor presencia de arenas finas, más gruesas que en otras zonas.

## 6. Conclusiones

Las conclusiones en este trabajo son las siguientes:

- La zona norte de la parte estudiada del coralígeno es la que presenta mayor enterramiento visualmente y además mayor tamaño de grano.
- La influencia de las tormentas se observa principalmente en la distribución latitudinal del tamaño de grano a partir de los distintos tipos de arena y su tamaño de grano medio, confirmando que existe una variación geográfica del sedimento.
- Los sedimentos predominantes que entierran el coralígeno son de arena fina bimodal, mostrando dos tipos primordiales de tamaño de grano, consecuencia del arrastre de arena por parte de las tormentas.
- El análisis granulométrico ha servido para ver que el tamaño medio de grano de las muestras está correlacionado tanto con la profundidad como la latitud, explicando el modelo de la diferencia de enterramiento entre el norte y el sur de la zona de estudio, y por tanto la orientación del coralígeno y de las tormentas influyen en nivel de enterramiento y el área que queda sepultada.
- Teniendo en cuenta el incremento de eventos meteorológicos extremos causado por el cambio climático, es de esperar que este enterramiento continúe ocurriendo y que acabe afectando a más zonas, con consecuencias en los organismos que dependen del coralígeno y con efectos en las capturas en la pesca.
- La cartografía actual disponible de esta zona no es acorde a la realidad, ya que no coincide con los datos recogidos ni con lo que se ha observado durante las inmersiones, quizás debido a la erosión y enterramiento por parte de las tormentas.
- Se ha obtenido material fotográfico del enterramiento gracias a las inmersiones realizadas para el muestreo.
- Se han estudiado las variaciones de altura de ola en Gandía entre 1980 y 2023 que han servido para ver un patrón creciente de fenómenos de tormenta y un ligero incremento de altura de ola durante esos años.

## 7. Trabajo futuro

Este proyecto asienta las bases para poder seguir trabajando y estudiando esta zona y el proceso de sedimentación que está ocurriendo. Por ello, algunos de los estudios que pueden ayudar a continuar este proyecto son los siguientes:

- Añadir estaciones permanentes en el coralígeno para medir el avance de la sedimentación en el tiempo.
- Desenterrar zonas sedimentadas para analizar los metros de arena enterrando el coralígeno.
- Implementar técnicas de acústica submarina para analizar toda el área y ver si se puede estimar la profundidad del sedimento y la extensión de la zona afectada.
- Hacer un seguimiento de la granulometría, más exhaustivo, para poder ampliar y comparar los datos obtenidos en este trabajo a lo largo del tiempo, además de aumentar el nivel de confianza de los resultados estadísticos.
- Tomar fotografías de cada uno de los puntos de muestreo para facilitar la identificación de las características de cada sitio y diferenciar el nivel de enterramiento de cada uno de ellos.

## 8. Bibliografía

- Agencia Estatal de Meteorología. Escalas de viento y oleaje. Disponible en línea. Fecha de último acceso: 07/12/2023. [https://www.aemet.es/es/conocermas/maritima/detalles/Escalas\\_de\\_viento\\_y\\_oleaje](https://www.aemet.es/es/conocermas/maritima/detalles/Escalas_de_viento_y_oleaje)
- Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N. J. M., Le Cozannet, G., & Lionello, P. (2022). Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [https://www.researchgate.net/publication/362431678\\_Climate\\_Change\\_2022\\_Impacts\\_Adaptation\\_and\\_Vulnerability\\_Working\\_Group\\_II\\_Contribution\\_to\\_the\\_Sixth\\_Assessment\\_Report\\_of\\_the\\_Intergovernmental\\_Panel\\_on\\_Climate\\_Change](https://www.researchgate.net/publication/362431678_Climate_Change_2022_Impacts_Adaptation_and_Vulnerability_Working_Group_II_Contribution_to_the_Sixth_Assessment_Report_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change)
- Alvarez-Fanjul, E., Pérez Gómez, B., de Alfonso Alonso-Muñoyerro, M., Lorente, P., García Sotillo, M., Lin-Ye, J., Aznar Lecocq, R., Ruíz Gil de la Serna, M., Pérez Rubio, S., Clementi, E., Coppini, G., García-León, M., Fernandes, M., García Valdecasas, J., García Valdecasas, J. M., Santos Muñoz, D., Luna Rico, M. Y., Mestres, M., Molina, R., Tintoré, J., Mourre, B., Masina, S., Mosso, C., Reyes, E., Santana, A. (2022). Copernicus Ocean State Report, issue 6. *Journal of Operational Oceanography*, 15(sup1), 151–159. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2022.2095169>
- Amarouche, K., & Akpinar, A. (2021). Increasing trend on stormwave intensity in the western mediterranean. *Climate*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/cli9010011>
- AN OPEN UNIVERSITY COURSE TEAM. (1989a). SHELF SEAS. In *Waves, Tides and Shallow Water Processes* (pp. 144–160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-2827-3.50012-4>
- AN OPEN UNIVERSITY COURSE TEAM. (1989b). WAVES. In *Waves, Tides and Shallow Water Processes* (pp. 7–42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-2827-3.50005-7>
- Ballesteros, E. (2006). Mediterranean coralligenous assemblages: A synthesis of present knowledge. *Oceanography and Marine Biology*, 44, 123–195. <https://doi.org/10.1201/9781420006391-7>
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (1999). Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 6–19. <https://doi.org/10.2110/jsr.69.6>
- Blanes Eckert, C. (2008). Caracterización granulométrica de las playas del litoral gerundense. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Capítulo 4. <http://hdl.handle.net/2099.1/6036>
- 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(11), 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Boggs, S. (2014). Principles of sedimentology and stratigraphy. In *Sedimentary Geology* (Vol. 105, Issues 1–2). [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(95\)00151-4](https://doi.org/10.1016/0037-0738(95)00151-4)
- Bolaños Sánchez, R. (2004). Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción. [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-93708>

- Bosence, D. W. J. (1983). Coralline algal reef frameworks. *Journal of the Geological Society*, 140(3), 365–376. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.140.3.0365>
- Bosence, D. W. J. (1985). The “Coralligène” of the Mediterranean — a Recent Analog for Tertiary Coralline Algal Limestones. In *Paleoalgology* (pp. 216–225).
- Bracchi, V., Savini, A., Marchese, F., Palamara, S., Basso, D., & Corselli, C. (2015). Coralligenous habitat in the Mediterranean Sea: a geomorphological description from remote. *Italian Journal of Geosciences*, 134(1), 32–40. <https://doi.org/10.3301/IJG.2014.16>
- Bracchi, V., Basso, D., Marchese, F., Corselli, C., & Savini, A. (2017). Coralligenous morphotypes on subhorizontal substrate: A new categorization. *Continental Shelf Research*, 144, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.06.005>
- Bracchi, V., Nalin, R., & Basso, D. (2016). Morpho-structural heterogeneity of shallow-water coralligenous in a Pleistocene marine terrace (Le Castella, Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 454, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.04.014>
- Cabaço, S., Santos, R., & Duarte, C. M. (2008). The impact of sediment burial and erosion on seagrasses: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3), 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.04.021>
- Calderón Gil, C.J. (2018). Análisis de la gestión socio-ambiental por parte de las cofradías de pescadores en la Comunidad Valenciana. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/111342>
- Canals, M., & Miranda, J. (2020). Sobre el temporal Gloria (19-23.01.20), els seus efectes sobre el país i el que se'n deriva.
- Çınar, M. E., Féral, J. P., Arvanitidis, C., David, R., Taşkın, E., Sini, M., Dailianis, T., Doğan, A., Gerovasileiou, V., Evcen, A., Chenuil, A., Dağlı, E., Aysel, V., Issaris, Y., Bakir, K., Nalmpanti, M., Sartoretto, S., Salomidi, M., Sapouna, A., Açıık, Sermin, Dimitriadis, C., Koutsoubas, D., Katağan, T., Öztürk, B., Koçak, F., Erdogan-Dereli, D., Önen, S., Özgen, Ö., Türkçü, N., Kirkim, F., Önen, M. (2020). Coralligenous assemblages along their geographical distribution: Testing of concepts and implications for management. In *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* (Vol. 30, Issue 8, pp. 1578–1594). <https://doi.org/10.1002/aqc.3365>
- Claudet, J., & Fraschetti, S. (2010). Human-driven impacts on marine habitats: A regional meta-analysis in the Mediterranean Sea. *Biological Conservation*, 143(9), 2195–2206. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.06.004>
- Coll, M., Piroddi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Ben Rais Lasram, F., Aguzzi, J., Ballesteros, E., Bianchi, C. N., Corbera, J., Dailianis, T., Danovaro, R., Estrada, M., Froglià, C., Galil, B. S., Gasol, J. M., Gertwagen, R., Gil, J., Guilhaumon, F., Kesner-Reyes, K., Kitsos, M-S., Koukouras, A., Lampadariou, N., Laxamana, E., López-Fé de la Cuadra, C. M., Lotze, H. K., Martín, D., Mouillot, D., Oro, D., Raicevich, S., Rius-Barile, J., Saiz-Salinas, J. I., San Vicente, C., Somot, S., Templado, J., Turon, X., Vafidis, D., Villanueva, R., Voultsiadou, E. (2010). The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. *PLoS ONE*, 5(8), e11842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011842>

- Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F., Nabat, P., Cabos Narvaez, W. D., Cavicchia, L., Djurdjevic, V., Li, L., Sannino, G., & Sein, D. V. (2019). Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea. *Climate Dynamics*, 53(3–4), 1371–1392. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z>
- Di Geronimo, I., Di Geronimo, R., Rosso, A., & Sanfilippo, R. (2002). Structural and taphonomic analysis of a columnar coralline algal build-up from SE Sicily. *Geobios*, 35, 86–95. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(02\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(02)00050-5)
- Earle, S. (2015). *Physical Geology*. Victoria, B.C.: BCcampus. Chapter 13, 361-364. Retrieved from <https://opentextbc.ca/geology/>
- Ferreira, R. N. (2021). Cut-off lows and extreme precipitation in eastern Spain: Current and future climate. *Atmosphere*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/atmos12070835>
- Flamant, C., Pelon, J., Hauser, D., Quentin, C., Drennan, W. M., Gohin, F., Chapron, B., & Gouillon, J. (2003). Analysis of surface wind and roughness length evolution with fetch using a combination of airborne lidar and radar measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(3), 1–26. <https://doi.org/10.1029/2002ic001405>
- Folk, R. L., Andrews, P. B., & Lewis, D. W. (1970). Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13(4), 937–968. <https://doi.org/10.1080/00288306.1970.10418211>
- Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *The Journal of Geology*, 62(4), 344–359. <https://doi.org/10.1086/626171>
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company, Austin, 182.
- Folk, R. L., & Ward, W. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3–26.
- Fundación Oceana en colaboración con la Fundación Biodiversidad. (2008). Hábitats en peligro. Propuesta de protección de Oceana.
- Galiatsatou, Panagiota & Makris, Christos & Baltikas, Vasilis & Krestenitis, Yannis & Prinos, Panayotis. (2023). Analysis of extreme storm surges at the Mediterranean coastline under climate change.
- Galli, G., Solidoro, C., & Lovato, T. (2017). Marine heat waves hazard 3D maps and the risk for low motility organisms in a warming Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science* (Vol. 4, Issue MAY). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00136>
- Garrabou, J., & Ballesteros, E. (2000). Growth of *Mesophyllum alternans* and *Lithophyllum frondosum* (Corallinales, Rhodophyta) in the northwestern Mediterranean. *European Journal of Phycology*, 35(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/09670260010001735571>
- Garrabou, J., Gómez-Gras, D., Ledoux, J.-B., Linares, C., Bensoussan, N., López-Sendino, P., Bazairi, H., Espinosa, F., Ramdani, M., Grimes, S., Benabdi, M., Souissi, J. Ben, Soufi, E., Khamassi, F., Ghanem, R., Ocaña, O., Ramos-Esplà, A., Izquierdo, A., Anton, I., ... Harmelin, J. G. (2019). Collaborative Database to Track

- Mass Mortality Events in the Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00707>
- Georgiadis, M., Papatheodorou, G., Tzanatos, E., Geraga, M., Ramfos, A., Koutsikopoulos, C., & Ferentinos, G. (2009). Coralligène formations in the eastern Mediterranean Sea: Morphology, distribution, mapping and relation to fisheries in the southern Aegean Sea (Greece) based on high-resolution acoustics. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 368(1), 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.10.001>
- Geraldo, J., Córdova Medina, I., Rivera Rivera, S. Y., Aguirre Jáuregui, A. H., Aranda Sánchez, F., Cortez Medina, Y. U., Fernández M., B., Guevara Lam, K. D., Hernández Serrano, A., Lizárraga Burgueño, M. V., Meza Muñoz, A., Mejía López, B. J., Mora Giles, K. D., Pulido Bustillos, D. M., Rojo Díaz de León, A., Vásquez Juvera, M. A., Alejandro, C. M. S., & Rivera Rivera, N. Y. (2022). Análisis granulométrico de Playa Hermosa, Ensenada, Baja California (Issue May). [10.13140/RG.2.2.23284.63369](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23284.63369)
- Gobierno de España. (2019). Acuerdo por el que se amplían los límites del parque nacional marítimo-terrestre del archipiélago de Cabrera por incorporación de espacios marinos colindantes al mismo. BOE número 43, Sec. I. p. 15697.
- Insua-Costa, D., Lemus-Cánovas, M., Miguez-Macho, G., & Llasat, M. C. (2021). Climatology and ranking of hazardous precipitation events in the western Mediterranean area. *Atmospheric Research*, 255, 105521. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105521>
- Le Cozannet, G., Raucoles, D., Wöppelmann, G., Garcin, M., Da Silva, S., Meyssignac, B., Gravelle, M., & Lavigne, F. (2015). Vertical ground motion and historical sea-level records in Dakar (Senegal). *Environmental Research Letters*, 10(8), 84016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084016>
- Lejeusne, C., Chevaldonné, P., Pergent-Martini, C., & Boudouresque, C. (2010). Climate change effects on a miniature ocean: The highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. In *Tr. Ecol. E* (p. vol. 25, 250-260). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.009>
- Martínez Baños, L. (2022). El coralígeno somero de la costa de Gandia. <http://hdl.handle.net/10251/188115>
- Mösso, C., Gracia, V., Mestres, M., Sierra, J. P., & Sánchez-Arcilla, A. (2020). Sediment Mobility at Fangar Bay Entrance (NW Spanish Mediterranean): Management Implications under Present and Future Climates. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 894–899. <https://doi.org/10.2112/SI95-174.1>
- Paoli, C., Montefalcone, M., Morri, C., Vassallo, P., & Bianchi, C. N. (2017). Ecosystem Functions and Services of the Marine Animal Forests. In *Marine Animal Forests* (pp. 1–42). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5\\_38-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_38-1)
- Peláez León, R. (2014). Estructura de la comunidad de un enclave de coralígeno de la costa de Gandia. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/44889>
- Piazzì, L., Gennaro, P., & Balata, D. (2012). Threats to macroalgal coralligenous assemblages in the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 64(12), 2623–2629. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.027>

- Portillo Juan, N., Negro Valdecantos, V., & del Campo, J. M. (2022). Analysis of Monthly Recorded Climate Extreme Events and Their Implications on the Spanish Mediterranean Coast. *Water (Switzerland)*, 14(21).  
<https://doi.org/10.3390/w14213453>
- UNEP-MAP RAC/SPA 2010. The Mediterranean Sea Biodiversity: state of the ecosystems, pressures, impacts and future priorities. By Bazairi, H., Ben Haj, S., Boero, F., Cebrian, D., De Juan, S., Limam, A., Leonart, J., Torchia, G., and Rais, C., Ed. RAC/SPA, Tunis; 100 pages.
- Regional Activity Centre for Specially Protected Areas. (2003). The coralligenous in the Mediterranean Sea. In *Geophysical Research Letters* (Vol. 32, Issue 24, pp. 10–13).
- Rindi, F., Braga, J. C., Martin, S., Peña, V., Le Gall, L., Caragnano, A., & Aguirre, J. (2019). Coralline Algae in a Changing Mediterranean Sea: How Can We Predict Their Future, if We Do Not Know Their Present? *Frontiers in Marine Science*, 6.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00723>
- Rodríguez-López, E., Maimi-Checa, M., Toran, C., Feliu, B., & Rodilla, M. (2023). Arrecifes mediterráneos de algas calcáreas esciáfilas: efecto del cambio climático. In *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acuí.* 11 (pp. 105–118).
- Rodríguez-López, E. (2020). Cambios batimétricos en la estructura de la comunidad de las formaciones de coralígeno de plataforma someras del sector sur del Golfo de Valencia. *Universitat Politècnica de València*. <http://hdl.handle.net/10251/139421>
- Rogers, C. S. (1990). Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine Ecology Progress Series*, 62(1), 185–202.  
<https://doi.org/10.3354/meps062185>
- Sánchez-Almodóvar, E., Martín-Vide, J., Olcina-Cantos, J., & Lemus-Canovas, M. (2022). Are Atmospheric Situations Now More Favourable for Heavy Rainfall in the Spanish Mediterranean? Analysis of Episodes in the Alicante Province (1981–2020). *Atmosphere*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/atmos13091410>
- Sarà, M. (1968). Research on Benthic Fauna of Southern Adriatic Italian Coast. University of Bari. Instituto e Museo di zoologia e Anatomia Comparata.  
<https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0672038>
- Sayol, J. M., & Marcos, M. (2018). Assessing Flood Risk Under Sea Level Rise and Extreme Sea Levels Scenarios: Application to the Ebro Delta (Spain). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(2), 794–811.  
<https://doi.org/10.1002/2017JC013355>
- Schories, D., & Niedzwiedz, G. (2012). Precision, accuracy, and application of diver-towed underwater GPS receivers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4), 2359–2372. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2122-7>
- Sims, D. W., Southall, E. J., Tarling, G. A., & Metcalfe, J. D. (2005). Habitat-specific normal and reverse diel vertical migration in the plankton-feeding basking shark. *Journal of Animal Ecology*, 74(4), 755–761. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2005.00971.x>
- Soto-Navarro, J., Jordá, G., Amores, A., Cabos, W., Somot, S., Sevault, F., Macías, D., Djurdjevic, V., Sannino, G., Li, L., & Sein, D. (2020). Evolution of Mediterranean Sea

- water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble. In *Climate Dynamics* (Vol. 54, Issues 3–4). <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05105-4>
- Puertos del Estado. (2020). Conjunto de datos SIMAR. 1–7. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Fecha de publicación: 20/02/2020.
- Suresh, G., Sutharsan, P., Ramasamy, V., & Venkatachalapathy, R. (2012). Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 84, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.06.027>
- Thierry de Ville d'Avray, L., Ami, D., Chenuil, A., David, R., & Féral, J.-P. (2019). Application of the ecosystem service concept at a small-scale: The cases of coralligenous habitats in the North-western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.057>
- Toscano, F., & Sorgente, B. (2002). Rhodalgae-bryomol temperate carbonates from the Apulian shelf (Southeastern Italy), relict and modern deposits on a current dominated shelf. In *Facies* (Issue 46, pp. 103–118). <https://doi.org/10.1007/bf02668076>
- Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 25(1), 655–744. <https://doi.org/10.1130/GSAB-25-655>
- Council directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora, 7 (1992). Article 6 EU Habitats Directive. <http://data.europa.eu/eli/dir/1992/43/oj>
- Weimerskirch, H., Corre, M. Le, Jaquemet, S., & Marsac, F. (2005). Foraging strategy of a tropical seabird, the redfooted booby, in a dynamic marine environment. *Marine Ecology Progress Series*, 288, 251–261.
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392. <http://www.jstor.org/stable/30063207>