



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido  
al cambio climático mediante el análisis de series  
históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de  
Valencia y el Cabo de Cullera (Valencia).

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Ortuño Moreno, Eduardo

Tutor/a: Molines Llodrá, Jorge

Cotutor/a: Medina Folgado, Josep Ramon

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

## RESUMEN

En las últimas décadas, muchas playas del litoral valenciano han sufrido fuertes procesos erosivos artificiales cuya causa ha sido la construcción de numerosas barreras litorales (espigones, puertos, etc.) y fluviales (embalses), además de otras causas locales como la ocupación de campos dunares o las posibles variaciones meteorológicas debidas al cambio climático.

En el futuro, además de la continuación de los procesos erosivos señalados previamente, la línea de costa se enfrentará a las consecuencias esperadas debido a la existencia de cambio climático, el cual resulta evidente.

En el presente trabajo, se estudia la evolución del transporte sólido litoral, realizando un pronóstico de este para las próximas décadas mediante el empleo de técnicas analíticas y estadísticas. Todo ello, junto a la erosión generalizada esperada por la subida del nivel medio del mar, origina la propuesta de alimentación artificial para anticiparse los futuros daños esperados sobre el tramo costero situado al sur del Puerto de Valencia, comprendido entre la Playa de Pinedo y el Cabo de Cullera, el cual viene sufriendo durante las últimas décadas de manera acentuada las consecuencias anteriormente descritas.

Todo ello compone el *Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera (Valencia)*.

**Palabras clave:** alimentación artificial; cambio climático; erosión; playa; retroanálisis; transporte sólido litoral.

## RESUM

En les darreres dècades, moltes platges del litoral valencià han patit forts processos erosius artificials la causa dels quals ha estat la construcció de nombroses barreres litorals (espigons, ports, etc.) i fluvials (embassaments), a més d'altres causes locals com l'ocupació de camps dunars o les possibles variacions meteorològiques degudes al canvi climàtic.

En el futur, a més de la continuació dels processos erosius assenyalats prèviament, la línia de costa s'enfrontarà a les conseqüències esperades a causa de l'existència de canvi climàtic, el qual resulta evident.

En aquest treball, s'estudia l'evolució del transport sòlid litoral, fent-ne un pronòstic per a les properes dècades mitjançant l'ús de tècniques analítiques i estadístiques. Tot això, juntament amb l'erosió generalitzada esperada per la pujada del nivell mitjà del mar, origina la proposta d'alimentació artificial per anticipar-se els futurs danys esperats sobre el tram costaner situat al sud del Port de València, comprès entre la Platja de Pinedo i el Cap de Cullera, el qual pateix durant les últimes dècades de manera accentuada les conseqüències anteriorment descrites.

Tot això compon *Estudi de l'evolució del transport sòlid litoral a causa del canvi climàtic mitjançant l'anàlisi de sèries històriques. Aplicació a les platges entre el Port de València i el Cap de Cullera (València).*

**Paraules clau:** alimentació artificial; canvi climàtic; erosió; platja; retroanàlisi; transport sòlid litoral.

## ABSTRACT

In recent decades, many beaches on the Valencian coast have suffered strong artificial erosion processes, the cause of which has been the construction of numerous coastal (breakwaters, ports, etc.) and river (reservoirs) barriers, in addition to other local causes such as the occupation of fields dunes or possible weather variations due to climate change.

In the future, in addition to the continuation of the previously mentioned erosive processes, the coastline will face the expected consequences due to the existence of climate change, which is obvious.

In the present work, the evolution of littoral solid transport is studied, making a forecast of this for the coming decades through the use of analytical and statistical techniques. All of this, together with the generalized erosion expected due to the rise in the average sea level, originates the proposal for artificial feeding to anticipate the expected future damages on the coastal section located to the south of the Port of Valencia, between the Playa de Pinedo and the Cabo de Cullera, which has been suffering during the last decades in an accentuated way the consequences described above.

All this makes up the *Study of the evolution of coastal solid transport due to climate change through the analysis of historical series. Application to the beaches between the Port of Valencia and the Cape of Cullera (Valencia)*.

**Key words:** artificial feeding; climate change; erosion; beach; retroanalysis; littoral solid transport.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer de manera sincera a mis tutores, Jorge Molines Llodrá y Josep Ramon Medina Folgado, por toda la ayuda y tiempo prestados, así como por presentarme la oportunidad de realizar la Beca Colaboración del Ministerio de Educación del Gobierno de España, fruto de la cual nace el presente trabajo.

A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional.

A todos ellos, muchas gracias.

## Índice de contenido

1. Introducción.....	15
2. Descripción de la costa valenciana.....	17
3. Cambio climático.....	20
3.1 Introducción.....	20
3.2 Paleoclimatología.....	22
3.3 Cambio climático global.....	24
3.4 Cambio climático en el litoral valenciano.....	30
3.4.2 Factores antropogénicos de cambio.....	34
3.4.3 Impactos observados en la costa.....	35
3.5 Incertidumbres y necesidades de información.....	37
4. Métodos para verificar el cambio de las variables climáticas.....	38
5. Evaluación de las variables climáticas en la zona de valencia.....	42
5.1 Fuentes de información climática.....	42
5.1.1 Temperatura.....	42
5.1.2 Oleaje.....	44
5.2 Metodología de trabajo.....	46
5.2.1 Introducción.....	46
5.2.2 Homogeneización de los datos.....	47
5.2.3 Ajuste estadístico mensual.....	49
5.2.4 Ajuste de Fourier.....	51
5.2.5 Bootstrapping.....	52
5.3 Aplicación a temperatura.....	53
5.3.1 Estudio de los datos.....	53
5.3.2 Resultados.....	54
5.3.3 Conclusiones.....	58
5.4 Aplicación a transporte sólido litoral.....	58
5.4.1 Introducción a la dinámica litoral.....	58
5.4.2 Estudio de los datos.....	66

5.4.3 Resultados.....	69
5.4.4 Conclusiones.....	82
6. Propuesta de aplicación: alimentación artificial de las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera .....	84
6.1 Introducción.....	84
6.2 Conceptos previos de playas.....	85
6.3 Pronósticos de transporte sólido 2040.....	88
6.3.1 Metodología.....	88
6.3.2 Resultados.....	91
6.3.3 Conclusiones.....	97
6.4 Evolución línea de costa entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera.....	98
6.5 Volumen necesario para la alimentación artificial .....	104
6.5.1 Volumen necesario debido a la capacidad de transporte de sedimentos .....	104
6.5.2 Volumen necesario debido a la subida del nivel del mar .....	105
6.5.3 Volumen total .....	111
6.6 Yacimiento de material sedimentario .....	111
6.7 Caracterización de sedimentos .....	115
6.7.1 Caracterización del yacimiento .....	116
6.7.2 Caracterización arenas Puerto de Valencia-Cabo de Cullera .....	117
6.7.3 Conclusión.....	118
6.8 Estudio del dragado .....	118
6.8.1 Estudio técnico de la extracción de arena.....	118
6.8.2 Cálculo estimativo de la producción y tiempo de dragado.....	125
6.8.3 Impacto ambiental de la actuación propuesta.....	135
6.8.4 Conclusiones.....	139
6.9 Estudio económico de la alimentación artificial.....	140
7. Conclusiones.....	144
8. Referencias .....	146
ANEXO 1. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) .....	152

ANEXO 2. PLANOS..... 157



## Índice de figuras

Figura 1. Unidades morfodinámicas del litoral valenciano .....	17
Figura 2. Playas que componen el tramo de costa comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera. ....	18
Figura 3. Factores y elementos climáticos.....	21
Figura 4. Aumento de la temperatura de la superficie terrestre.....	26
Figura 5. Proyecciones de cambio regional de la temperatura y humedad del suelo 2100. ....	26
Figura 6. Cambio global medio del nivel del mar con relación a 1900.....	27
Figura 7. Cambio en el nivel medio del mar según los escenarios de emisiones RCP2.6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha).....	27
Figura 8. Escenarios de emisiones futuras.....	29
Figura 9. Mar Mediterráneo.....	31
Figura 10. Proyecciones del nivel medio del mar local (m) en el período 2081-2100 (con respecto al período 1986-2005) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) en las costas españolas incluyendo la subsidencia natural del Delta del Ebro. ....	32
Figura 11. Tasa de cambios observados en el flujo medio de energía del oleaje (izquierda) y la potencia eólica (derecha) en los últimos 60 años .....	33
Figura 12. Proyecciones de altura de ola media para el escenario A1B en el período 2070-2100. ....	33
Figura 13. Porcentaje de cambio en la cota de inundación para el año 2040.....	35
Figura 14. Retroceso en playas debido a la subida del nivel del mar en el año 2040. ...	36
Figura 15. Localización punto latitud 39.5° N longitud 0.0° E.....	44
Figura 16. Localización punto SIMAR 2084114. Latitud 39.5 °N Longitud 0.0 °E. ....	46
Figura 17. Fases que componen la metodología de trabajo basada en el análisis de tendencias. ....	47
Figura 18. Comparativa entre la variable lineal y circular. ....	48
Figura 19. Ejemplo de distribución normal. ....	49
Figura 20. Ejemplo de distribución Lognormal.....	50
Figura 21. Ejemplo de distribución Weibull .....	50
Figura 22. Esquema de descomposición del oleaje y del transporte de sedimentos generado.....	60

Figura 23. Tipos de transporte longitudinal de sedimentos.....	60
Figura 24. Direcciones predominantes de oleaje y fetch asociado.....	61
Figura 25. Relación de ángulos para el cálculo de transporte longitudinal.....	65
Figura 26. Dirección de la línea de costa de la Playa del Saler (Valencia).....	66
Figura 27. Direcciones de transporte sólido litoral respecto a la línea de costa de la Playa del Saler.....	67
Figura 28. Funciones de la playa en el territorio.....	86
Figura 29. Zonificación de las playas.....	87
Figura 30. Perfil de una playa.....	87
Figura 31. Perfiles de berma y de barra.....	88
Figura 32. Metodología de aplicación al transporte sólido litoral y elaboración de pronósticos.....	89
Figura 33. Evidencias morfológicas del transporte sólido longitudinal.....	98
Figura 34. Evolución de la línea de costa en el subtramo Playa de Pinedo - Gola del Pujol.....	100
Figura 35. Evolución de la línea de costa en el subtramo Gola del Pujol - Gola del Perellonet.....	101
Figura 36. Evolución de la línea de costa en el subtramo Gola del Perellonet - Gola del Perelló.....	102
Figura 37. Evolución de la línea de costa en el subtramo Gola del Perelló - Cabo de Cullera.....	103
Figura 38. Variables que intervienen en la Regla de Bruun (1962).....	105
Figura 39. Estimación del aumento del nivel del mar sobre la Península Ibérica según el escenario de emisiones RCP4.5 para el año 2040.....	108
Figura 40. Estimación del aumento del nivel del mar sobre la línea de costa de la Península Ibérica según el escenario de emisiones RCP4.5 para el año 2040.....	109
Figura 41. Estimación parámetro B, distancia línea de orilla-profundidad de cierre... ..	109
Figura 42. Longitud tramo playa del Saler-Cabo de Cullera.....	110
Figura 43. Ubicación del yacimiento.....	112
Figura 44. Polígonos de extracción de sedimentos.....	113
Figura 45. Muestra de arena del yacimiento.....	116
Figura 46. Clasificación de las dragas.....	119
Figura 47. Draga de succión en marcha.....	119

Figura 48. Fases del ciclo de dragado.....	121
Figura 49. Valor del parámetro $f_e$ . ....	129
Figura 50. Costes de una draga de succión en marcha. ....	140
Figura 51. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	153

## Índice de gráficos

Gráfico 1. Evolución de la media del ajuste Lognormal de la Temperatura Máxima Diaria. .....	54
Gráfico 2. Evolución de la media del ajuste Lognormal junto al ajuste de Fourier. ....	55
Gráfico 3. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente del ajuste de Fourier. .....	56
Gráfico 4. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente del ajuste de Fourier. .....	57
Gráfico 5. Evolución parámetro de escala (A) durante 756 meses. ....	70
Gráfico 6. Evolución parámetro de escala (A) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. ....	70
Gráfico 7. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier.....	71
Gráfico 8. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. ....	71
Gráfico 9. Evolución parámetro de forma (B) durante 756 meses.....	72
Gráfico 10. Evolución parámetro de forma (B) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier.....	72
Gráfico 11. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier.....	73
Gráfico 12. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. ....	73
Gráfico 13. Evolución valor medio (t) distribución Weibull Norte-Sur durante 756 meses. .....	74
Gráfico 14. Evolución valor medio (t) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. .....	74
Gráfico 15. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier.....	75
Gráfico 16. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. ....	75
Gráfico 17. Evolución parámetro de escala (A) durante 756 meses. ....	76
Gráfico 18. Evolución parámetro de escala (A) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier.....	76
Gráfico 19. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier.....	77
Gráfico 20. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. ....	77
Gráfico 21. Evolución parámetro de forma (B) durante 756 meses.....	78
Gráfico 22. Evolución parámetro de forma (B) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier.....	78
Gráfico 23. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier.....	79

Gráfico 24. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. ....	79
Gráfico 25. Evolución valor medio (t) distribución Weibull Sur-Norte durante 756 meses. .....	80
Gráfico 26. Evolución valor medio (t) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. .....	80
Gráfico 27. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier.....	81
Gráfico 28. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. ....	81
Gráfico 29. Resultados evolución transporte sólido litoral mensual dirección Norte-Sur. .....	91
Gráfico 30. Resultados evolución transporte sólido litoral anual dirección Norte-Sur..	92
Gráfico 31. Resultados evolución número de horas en que se produce transporte sólido litoral dirección Norte-Sur.....	92
Gráfico 32. Resultados evolución transporte sólido litoral mensual dirección Sur-Norte. .....	93
Gráfico 33. Resultados evolución transporte sólido litoral anual dirección Sur-Norte..	93
Gráfico 34. Resultados de la evolución del número de horas en que el transporte sólido litoral tiene la dirección Sur-Norte. ....	94
Gráfico 35. Resultados evolución transporte sólido litoral bruto mensual.....	95
Gráfico 36. Resultados evolución transporte sólido litoral bruto anual. ....	95
Gráfico 37. Resultados evolución transporte sólido litoral neto mensual. ....	96
Gráfico 38. Resultados evolución transporte sólido litoral neto anual.....	96

## Índice de tablas

Tabla 1. Equivalencia a grados temporales. ....	48
Tabla 2. Parámetros de cálculo.....	64
Tabla 3. Valores de profundidad de cierre en playas valencianas para T=20 años.....	108
Tabla 4. Cálculo volúmenes necesarios para llevar a cabo la alimentación artificial. .	111
Tabla 5. Área de extracción y volumen de arena de cada polígono. ....	113
Tabla 6. Volúmenes de material obtenidos en estudios anteriores.....	114
Tabla 7. Volúmenes de material aptos para regeneración de cada polígono.....	114
Tabla 8. Características granulométricas del árido del yacimiento. ....	116
Tabla 9. Características granulométricas del árido del yacimiento .....	117
Tabla 10. Dragas tipo Jumbo. ....	120
Tabla 11. Hipótesis de partida para determinar el ciclo de la draga.....	126
Tabla 12. Factor de esponjamiento según el tipo de terreno. ....	127
Tabla 13. Calificación del personal. ....	131
Tabla 14. Volumen requerido y distancia media del tramo.....	132
Tabla 15. Características de una draga de succión en marcha tipo Jumbo-Cristóbal Colón (2008). ....	132
Tabla 16. Mantenimiento de rutina - Coste por día.....	142
Tabla 17. Reparaciones mayores - Coste por día. ....	142
Tabla 18. Coste económico total de la actuación. ....	143
Tabla 19. Relación del TFG con los ODS. ....	154

## 1. Introducción

El cambio climático es un fenómeno ampliamente aceptado por nuestra sociedad, sin embargo, los efectos asociados al mismo van más allá del simple aumento de la temperatura al que la mayor parte de la sociedad presta atención.

El cambio climático tiene consecuencias sobre la mayor parte del planeta, afectando a infraestructuras, playas y los ecosistemas que sustentan, en este caso, los ecosistemas marinos y litorales, en torno a los cuales se desarrolla el presente trabajo.

¿Está realmente subiendo el nivel del mar? ¿Cómo está afectando el cambio climático a la línea de costa? ¿Existen métodos que permitan determinar efectos futuros sobre el transporte de sedimentos? Estas son algunas de las preguntas a las que el presente trabajo trata de dar respuesta. Previo a ello, es necesario conocer el entorno costero.

Las zonas costeras son el punto de encuentro entre el mar y la tierra, y uno de los entornos naturales más dinámicos del Planeta; un gran número de actividades humanas se desarrollan en ellas, atrayendo numerosa población e importantes inversiones (Ministerio de Medio Ambiente, 2008).

Cuando se observa la costa, a menudo es creído que esta ha permanecido inalterable durante mucho tiempo; la playa parece que ha estado ahí siempre, y siempre igual, al igual que el acantilado, el peñasco o los escollos. Pero esto no es cierto, la costa es un elemento que está continuamente cambiando, estructurándose en diversidad de formas que, a su vez, siguen cambiando, sensibles a cualquier agente exterior que actúe sobre ellas (De la Peña, J.M, 2007).

En la actualidad, las numerosas actuaciones antrópicas desde la revolución industrial, como las construcciones de presas, puertos y otras barreras litorales y fluviales, sumado a los efectos producidos por el cambio climático están provocando fuertes desequilibrios en los procesos sedimentarios.

Es por ello, que resulta de gran importancia el desarrollo de estrategias de actuación en la costa de todo el país. Una gran parte de las playas del litoral mediterráneo seguirán erosionándose si no se aplica el principio de la sostenibilidad, el cual permite el progreso económico y social de la generación presente sin comprometer el desarrollo de las futuras generaciones.

El presente trabajo tiene por objeto principal el estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas del tramo de costa situado entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera. Para ello se incluye la aplicación de herramientas estadísticas y matemáticas con el fin de detectar tendencias que determinen la existencia de cambio climático, así como establecer proyecciones a futuro.

Posteriormente se propone como solución la alimentación artificial de este tramo de playas de modo que, en lugar de seguir corrigiendo los daños producidos en las últimas décadas, se anticipe a la futura erosión provocada por el cambio climático y el transporte de sedimentos para el año 2040, convirtiéndose en una de las primeras actuaciones sobre la costa española que anticipa y se prepara para combatir los futuros efectos del cambio climático.

Este documento incluye el desarrollo de un modelo de previsión a futuro de la capacidad del transporte de sedimentos, además del estudio técnico y económico del proceso completo de alimentación artificial sobre el tramo correspondiente. Todo ello con el fin de llegar a la solución más eficiente posible teniendo en cuenta la situación actual de la costa valenciana, y de modo que este procedimiento de actuación sea extrapolable a todas las unidades morfológicas que componen el litoral español.



## 2. Descripción de la costa valenciana

La Costa de Valencia es el tramo litoral que se encuentra formando el golfo de Valencia, en la costa oriental de la Península Ibérica, en la provincia de Valencia. Limita con las otras dos costas de la Comunidad Valenciana, al norte con la Costa del Azahar (Castellón) y al sur con la Costa Blanca (Alicante).

La línea de costa que conforma la Costa de Valencia está compuesta por 109 kilómetros a lo largo de los cuales destacan muy pocos accidentes geográficos, siendo el más destacable el Cabo de Cullera. La costa generalmente es baja y arenosa favoreciendo la presencia de abundantes arenas, así como zonas pantanosas como la Albufera de Valencia (Wikipedia, 2021).

La Costa de Valencia se encuentra dividida en dos principales unidades morfológicas: la UMA Valencia (costa norte de Valencia) y la UMA Cullera (costa sur de Valencia), quedando divididas en el S. XIX, tras la construcción del Puerto de Valencia, una barrera total al transporte litoral de sedimentos (De Esteban Chapapría, 2020).

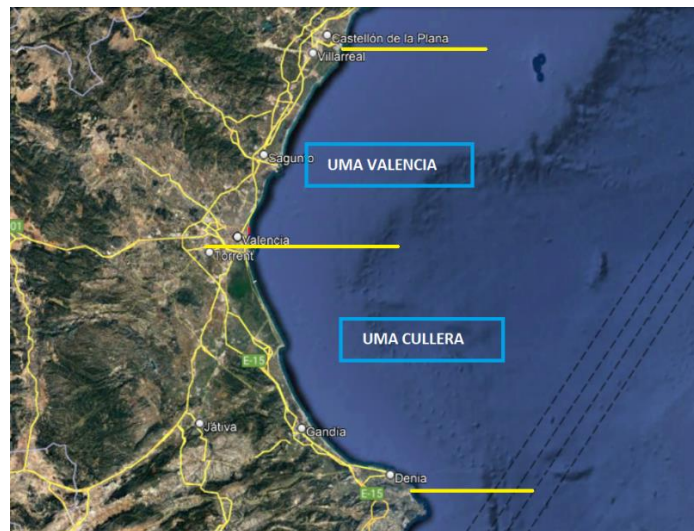


Figura 1. Unidades morfodinámicas del litoral valenciano. Fuente: Google Earth (2022).

La UMA Cullera, objeto de estudio del presente trabajo, a su vez, se encuentra dividida morfológicamente en dos subunidades o tramos: el tramo norte que discurre desde la desembocadura del río Turia hasta el cabo de Cullera, y el tramo sur, desde este cabo hasta la playa de Les Deveses, siendo esta la primera playa perteneciente a la provincia de Alicante.

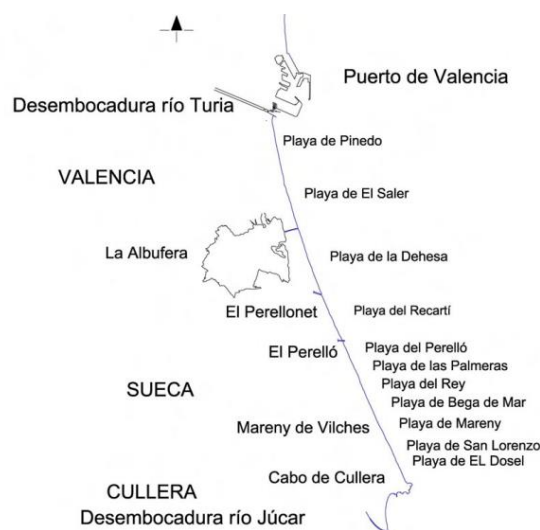
Previo a la construcción de cientos de barreras fluviales (presas) y litorales (diques) a partir del S. XIX, la costa valenciana disponía de una gran playa sobre la cual se hacían crecer los campos dunares cada década, por ejemplo, en la playa de El Saler.

Sin embargo, tras la construcción de estas barreras parciales y totales al transporte litoral y fluvial de sedimentos, se comenzaron a producir los numerosos desequilibrios que sufren las playas a día actual. Un ejemplo de construcción de barrera total al transporte de sedimentos es el Puerto de Valencia, destacando por su importancia y efectos notables sobre la zona objeto de estudio.

### UMA CULLERA (TRAMO NORTE)

El presente tramo objeto de estudio, comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera, se encuentra conformado por una sucesión de playas, muchas se encuentran en un estado de regresión grave debido principalmente a la falta de aportes sedimentarios del río Turia y de la costa al norte del puerto, al efecto sombra y de difracción que provocan las obras de abrigo de este puerto y al transporte de sedimentos longitudinal continuo neto hacia el sur que producen los temporales más energéticos, de procedencia NE.

Además, existe una continua y evidente tendencia al aumento del nivel del mar en toda la costa mediterránea, por lo que resulta de gran importancia adaptar y anticipar los tramos de costa a los efectos evidentes e inequívocos del cambio climático.



**Figura 2. Playas que componen el tramo de costa comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera. Fuente: MITECO (2015).**

Cabe destacar la fuerte presión urbanística sufrida en este tramo de costa. La playa que forma el frente del Saler, entre la Albufera y el mar fue objeto de presión y especulación urbanística entre los años sesenta y ochenta del pasado siglo XX. Sin embargo, el retroceso de la línea de costa, consecuencia de las erosiones producidas por las barreras al transporte sólido litoral, frenó el desarrollo urbanístico y obligó a una recuperación del espacio que se pretendía y comenzó a urbanizar.

En las últimas décadas se han experimentado fuertes retrocesos de la línea de costa, un ejemplo de ello es la discoteca de Pinedo que en el año 1960 quedaba a 109 metros de la orilla de la playa y en el año 2009 a tan solo 25 metros, o la pista de atletismo del antiguo polideportivo que en 1986 estaba a 65 metros de la orilla mientras que en el año 2009 se redujo a 34 metros. A día de hoy, esta línea de orilla sigue retrocediendo varios metros al año (CEDEX, 2015).

Es por ello, que resulta de gran importancia anticiparse a los futuros cambios provocados por el cambio climático, ya que, debido a que la erosión continua de estas playas se amenaza seriamente al Parque Natural de la Albufera, por el estrechamiento de la restinga que cierra la misma, con las graves e irreversibles consecuencias asociadas de tipo económico, social y también ambiental.

## 3. Cambio climático

### 3.1 Introducción

Según la Real Academia Española se define como cambio climático “el cambio del clima, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

El cambio climático es probable que sea el asunto predominante científico, económico, político y moral del siglo XXI. El destino de la humanidad y naturaleza puede depender del temprano reconocimiento y entendimiento de los efectos hechos por el humano en el clima de la Tierra (Hansen, 2009).

El crecimiento exponencial de la población en los dos últimos siglos y la búsqueda de la mejora en su calidad de vida, han impulsado un rápido crecimiento tecnológico que conlleva a una sobreexplotación de los recursos naturales del planeta y la aparición de agentes contaminantes, rompiendo su equilibrio y propiciando cambios climáticos a escala global.

El cambio climático tiene una gran influencia sobre la ingeniería civil, debido a que una gran parte de las infraestructuras que conforman nuestra sociedad, son construidas para paliar los efectos de este. Por otro lado, resulta de gran importancia adaptar las ya existentes a los efectos consecuentes del mismo. En el desarrollo del presente trabajo, se presta especial atención a la afección que tiene el cambio climático sobre el clima marítimo, especialmente sobre el transporte de sedimentos, el cual influye de modo directo en el diseño y planificación de las obras marítimas tales como la regeneración de playas.

El clima es algo en continuo cambio, ya sea por su naturaleza o la acción del hombre, por lo que un estudio dedicado a las posibles alteraciones climáticas debe ser constante en el tiempo. Ningún informe sobre cambio climático ha sido determinante, ni ha podido considerarse como acabado. La complejidad del estudio de los efectos en el mar provocados por el cambio climático va acompañada de adecuados sistemas de medida, de una buena utilización de los datos tomados y de un análisis científico continuo (Vargas-Yáñez et al., 2010).

Para el mejor entendimiento del clima, resulta trascendente conocer los factores y elementos que componen el mismo.

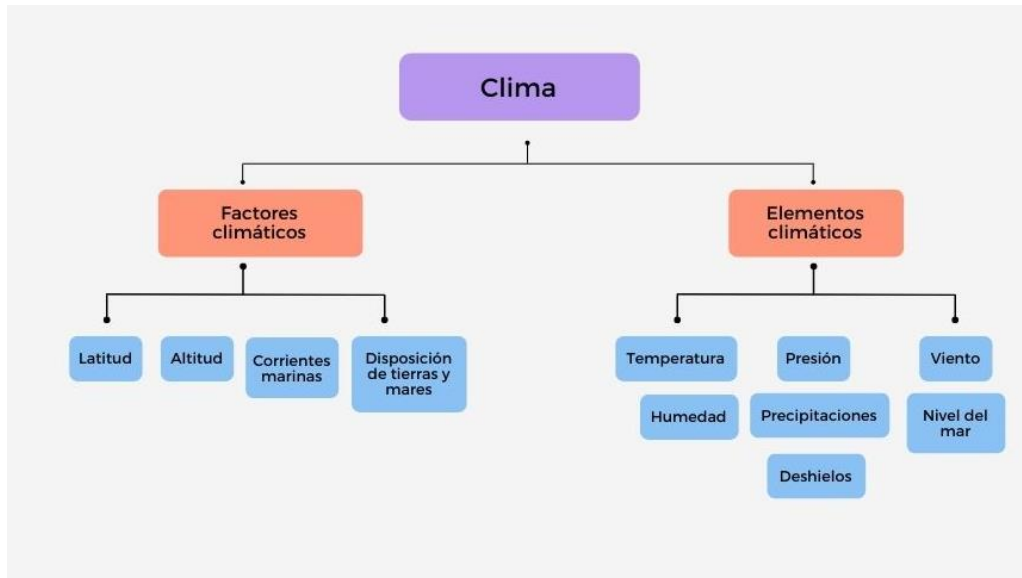


Figura 3. Factores y elementos climáticos. Fuente: elaboración propia.

Los factores del clima son un conjunto de circunstancias que determinan los diferentes tipos de climas. Dentro de los principales factores se encuentran la altitud, la latitud, las corrientes marinas y la disposición de tierras y mares. Estos factores modifican los elementos del clima.

Los elementos del clima que pueden provocar variaciones en el mismo son la temperatura, la presión atmosférica, el viento, la humedad, las precipitaciones, los deshielos y el nivel del mar.

El efecto del cambio climático sobre la temperatura, los niveles del mar o los cambios en intensidades y dirección de viento y oleaje a nivel global, es un hecho constatado. Existe una multitud de proyecciones de escenarios futuros, sin embargo, estos tienen asociada una elevada incertidumbre.

Para evaluar los efectos climáticos, existen herramientas que permiten determinar los niveles alternativos esperados de los cambios hechos por los humanos en la composición de la atmósfera, e incluyen: (1) la historia paleoclimática de la Tierra, demostrando como el clima respondió a cambios pasados en las condiciones de contorno incluida la composición atmosférica, (2) las observaciones modernas del cambio climático, especialmente observaciones globales de los satélites, coincidentes con las rápidas

cambios hechos por el humano y fuerzas naturales climáticas, y (3) modelos climáticos y teoría, la cual mediante la interpretación de ayuda de las observaciones en todas las escalas de tiempo son útiles para proyectar el futuro del clima bajo escenarios de fuerzas climáticas alternativas.

Estas proyecciones son principalmente basadas en los informes emitidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021). En sus diferentes reportes señalan que el mundo se está calentando, que el clima está cambiando, que muchos de estos cambios están relacionados con los gases de efecto invernadero y que estos cambios afectarán a los recursos naturales. Por ello, en cada uno de sus reportes, se plantean distintas proyecciones, basadas en posibles escenarios futuros de emisiones gases de efecto invernadero (GEI) y de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### 3.2 Paleoclimatología

Suele considerarse que el calentamiento atmosférico es un problema “moderno”, si bien esta dinámica es complicada, afecta a todo el mundo y se entremezcla con cuestiones difíciles como la pobreza, el desarrollo económico y el crecimiento demográfico; también este concepto está sesgado dentro de un contexto antropogénico, pues el cambio climático es mucho más amplio e incluye las variaciones climáticas que se han dado desde que el planeta Tierra presenta una atmósfera y son atribuidos a diversos factores como cambios en la actividad solar, cambios en la circulación oceánica, tectónica de placas (actividad volcánica o geológica) y cambios en la composición atmosférica (Caballero et.al., 2007).

El cambio climático, no es un asunto que se haya producido por primera vez en la Tierra en las últimas décadas. Tiene su origen hace cientos de millones de años, por ello, resulta de gran relevancia estudiar la paleoclimatología, así como los factores que a lo largo de la historia de la humanidad han originado los cambios. Los datos paleoclimáticos nos ayudan a evaluar la sensibilidad del clima y los efectos climáticos potenciales hechos por el humano.

A continuación, se realiza una breve descripción de la paleoclimatología, así como de los principales cambios sufridos en cada una de las épocas que componen la misma.

La paleoclimatología es la ciencia que se encarga de estudiar el clima y el cambio climático en el pasado.

El clima inicia en el Planeta Tierra con la aparición de la segunda atmósfera en el período Precámbrico, que es cuando se dan las condiciones para que existan los factores creadores del clima.

La edad de la Tierra es de unos 4.500 Ma, la vida apareció en ella hace unos 3.800 Ma, y los homínidos hace unos 4 Ma.

La Tierra primitiva tardó unos 700 Ma en moderar sus altas temperaturas, debidas al intenso bombardeo de meteoritos y a la elevada radiactividad inicial. Después, a pesar de que el Sol le enviaba una energía menor, algo más de un 20 % menos que hoy en día, las temperaturas en la Tierra fueron relativamente altas, es de suponer que por el efecto invernadero de una atmósfera con una concentración elevada de CO<sub>2</sub>, producido por el vulcanismo. Además, a partir de hace unos 3.500 Ma hubo también una elevada concentración atmosférica de metano, debido a la acción masiva de bacterias productoras de metano, lo cual contribuyó a ese elevado efecto invernadero de la Tierra joven.

Después, la Tierra ha pasado al menos por cinco eras glaciales, épocas de temperaturas bajas y formación de casquetes de hielo en los polos. La primera fue hace entre 2.700 y 2.300 millones de años y las demás se produjeron durante el precámbrico, el ordovícico, carbonífero, pérmico o cuaternario. Estas eras glaciales fueron provocadas por distintos motivos como la situación en los distintos continentes o épocas de reducciones de CO<sub>2</sub> atmosférico.

En la actualidad, la Tierra se encuentra en una era glacial, con un continente permanentemente helado: la Antártida. Esta era comenzó a gestarse hace unos 34 Ma, es decir, desde hace millones de años el planeta tierra se encuentra sumergido en una era glacial.

Han existido en la historia de la Tierra épocas en que las temperaturas medias han sido notablemente más alta que hoy día, considerando estas épocas más cálidas, aquellas asociadas a emisiones volcánicas masivas con la consecuente elevación de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, a la formación de supercontinentes con clima continental o a altos niveles de metano en el aire.



En cuanto a las precipitaciones, se piensa que en general han sido mayores a escala mundial en los períodos cálidos, por la mayor evaporación y capacidad de la atmósfera para almacenar y transportar humedad. Por el contrario, en las glaciaciones hubo más aridez y aumentaron las zonas de tundra y los desiertos.

Profundizando en la historia más reciente, hace 18.000 años comenzaron a ascender las temperaturas. Hace unos 12.500 años hubo un período de enfriamiento que duró unos mil años, el Younger Dryas. Tras el posterior calentamiento, hace 11.500 años, las temperaturas han variado poco, fueron un poco más cálidas hace entre 6.000 y 4.500 años, el llamado Máximo del Holoceno, y luego fueron descendiendo ligeramente. Después del año 800 d.C., en el llamado Periodo Cálido Medieval, los vikingos llegaron a colonizar algunas costas de Groenlandia. La Pequeña Edad del Hielo fue un enfriamiento que tuvo lugar entre los años 1550 y 1850 aproximadamente.

En el siglo XX ha habido unas décadas iniciales de calentamiento, luego ha habido otras de enfriamiento, entre 1940 y 1970, y las últimas han sido de notable calentamiento, tratándose el año 1998 del más cálido del siglo XX (Boned Pérez, 2006).

Ninguna situación anterior es igual a la actual, pero del estudio de otros períodos se puede obtener una mejor comprensión del sistema climático. Además, la aplicación a situaciones del pasado de los modelos climáticos, desarrollados para calcular el alcance del Cambio Climático actual, puede ayudar a mejorarlos, ya que los resultados se pueden comparar con los registros existentes del clima.

### 3.3 Cambio climático global

El IPCC es definido como una organización intergubernamental de las Naciones Unidas que se encarga de la evaluación científica sobre el cambio climático. Este grupo de expertos emite periódicamente informes de evaluación o reportes definidos según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España como “una serie de documentos técnicos, informes especiales e informes de evaluación que han puesto a disposición de la comunidad internacional, tanto responsables políticos como público en general, el conocimiento científico-técnico disponible sobre el cambio climático”.



La notación que se utiliza para cada documento publicado son las siglas AR (“Assessment Report”) seguido del número equivalente a la versión de dicha publicación.

El último que ha sido publicado (IPCC, 2021) es el Sexto Informe de Evaluación, denominado AR6 (siglas en inglés). Sin embargo, este último informe se encuentra pendiente de publicación de su síntesis de reporte (noviembre 2022), en el que se sintetizan otros documentos. Este Sexto Informe de Evaluación se apoya en los resultados del Quinto Informe de Evaluación (AR5), en los Informes Especiales del IPCC publicados en 2018 y 2019 e incorpora resultados posteriores de la ciencia del clima.

Según Alarcón y Brandt (2021), la influencia humana parece ser la razón principal de la retracción de los glaciares desde la década de 1990 y la disminución del hielo oceánico Ártico entre 1979-1988 y 2010-2019. Es muy probable que la influencia humana haya contribuido al derretimiento de la superficie observado de la capa de hielo de Groenlandia durante las últimas dos décadas, pero hay sólo hay pruebas limitadas de ello, con un acuerdo medio.

La influencia humana no solo ha causado un aumento de la temperatura de la superficie del océano, sino que también una disminución de los niveles de oxígeno y aumento de la acidificación.

La afección humana es un hecho en el sistema climático, como también que el planeta se encuentre en el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) más alto de su historia. Esto está provocando cambios relevantes en las distintas capas de la atmósfera, y si no se toman medidas urgentes, estas alteraciones pueden provocar situaciones desfavorables y difícilmente reversibles.

El aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero desde 1769 es, inequívocamente, causado por actividades humanas. Cada una de las últimas 4 décadas ha sido más cálida que cualquiera desde 1850.

La temperatura de la superficie terrestre fue 1,09 °C más cálida en 2011-2020 que en 1850-1900. El rango de aumento de la temperatura causado por las personas creció desde 1850-1900 a 2010-2019.

La temperatura global de la superficie seguirá, con un alto nivel de confianza, aumentando hasta al menos mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones considerados. El calentamiento global de 1,5°C y 2°C se superará durante el siglo XXI a menos que se produzcan profundas reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero en las próximas décadas.

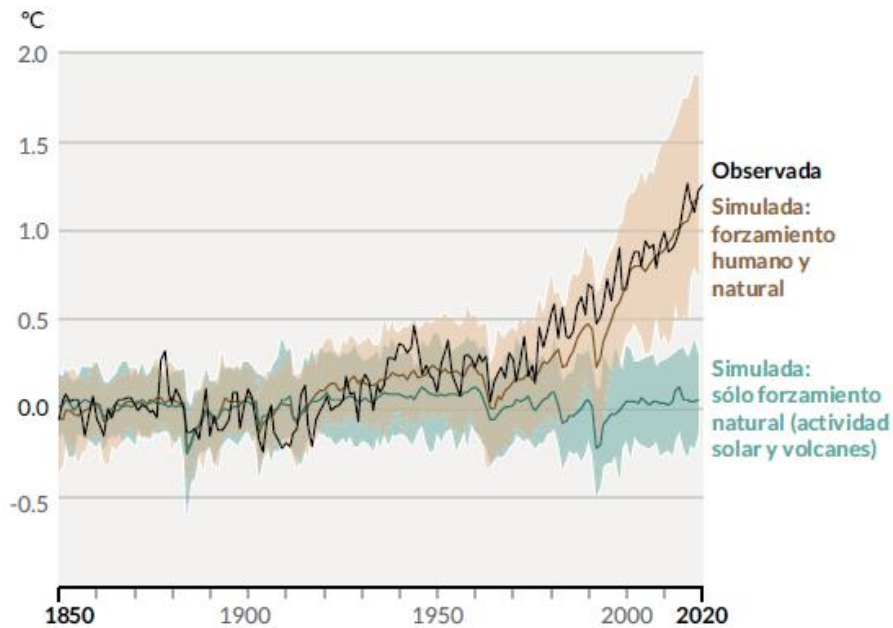


Figura 4. Aumento de la temperatura de la superficie terrestre. Fuente: Informe Grupo de Trabajo I del IPCC AR6 (2021).

También parece existir cambios en las tendencias de las precipitaciones globales.

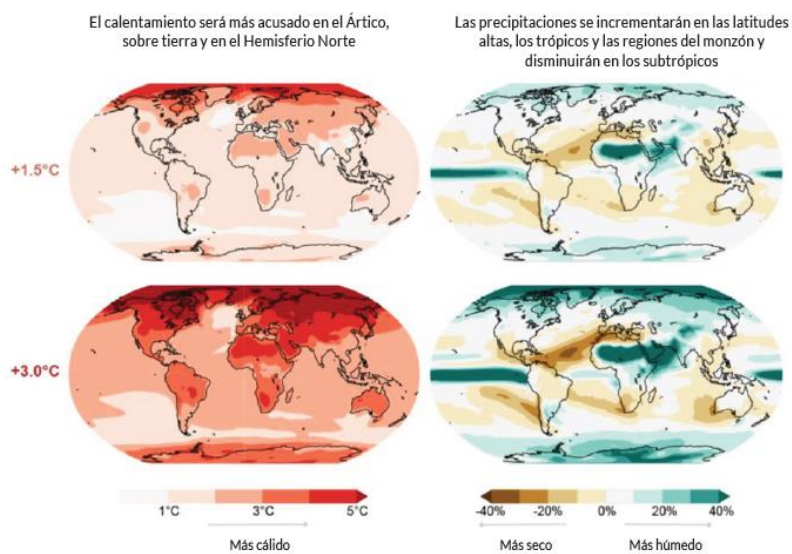


Figura 5. Proyecciones de cambio regional de la temperatura y humedad del suelo 2100. Fuente: Informe Grupo de Trabajo I del IPCC AR6 (2021).

El nivel del mar (global) ha aumentado cerca de 0,2 m. entre 1901 y 2018, y se incrementará adicionalmente entre 30 cm y 1 m en 2100 dependiendo de las emisiones futuras. El nivel del mar reacciona muy lentamente al calentamiento global por lo que su subida está asegurada por miles de años. Es muy probable que la influencia humana, de nuevo, haya sido el principal motor de estos aumentos desde al menos 1971. El aumento del nivel del mar también ha sido provocado por la pérdida de hielo en la tierra y la expansión térmica provocada por el calentamiento de los océanos.

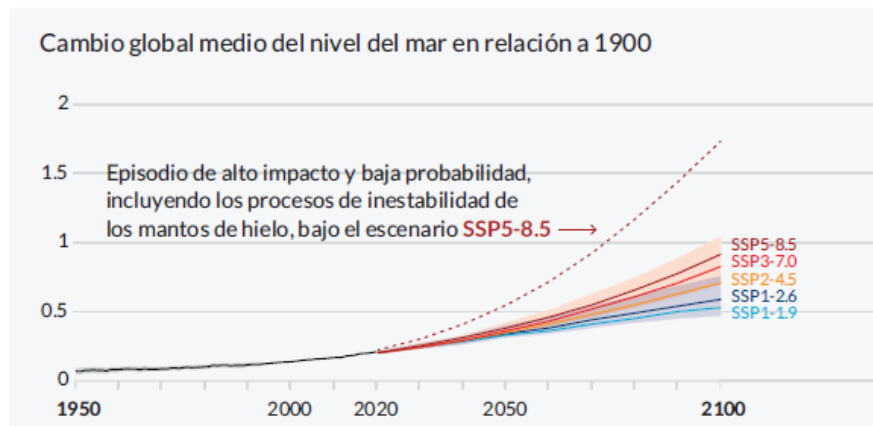


Figura 6. Cambio global medio del nivel del mar con relación a 1900. Fuente: Informe Grupo de Trabajo I del IPCC AR6 (2021).

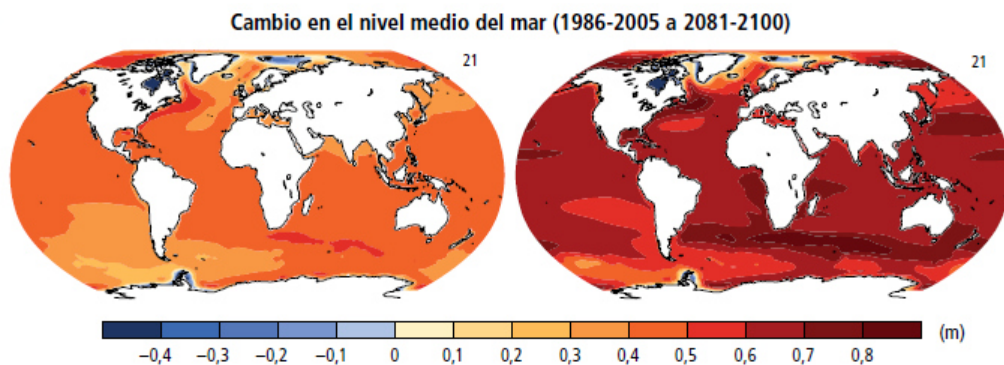


Figura 7. Cambio en el nivel medio del mar según los escenarios de emisiones RCP2.6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Fuente: Informe de Síntesis IPCC AR5 (2014).

Desde el año 1970 se están produciendo cambios en la biosfera terrestre que son coherentes con el calentamiento global: las zonas climáticas se han desplazado hacia los polos en ambos hemisferios, y la estación de crecimiento se ha alargado de media hasta dos días por década desde la década de 1950 en las zonas extra tropicales del hemisferio norte (confianza alta).

Todos estos cambios están provocando una afección a los fenómenos meteorológicos, a continuación, se muestran algunos ejemplos (Alarcón y Brandt, 2021):

- Las olas de calor se han vuelto más comunes desde la década de 1950, mientras que las temperaturas mínimas (incluyendo olas de frío) se han vuelto menos severas y comunes. Varios de estos cambios no hubiesen ocurrido sin el efecto de la influencia humana.
- Las olas de calor marinas se han duplicado aproximadamente en frecuencia desde la década de 1980 (confianza alta), y es muy probable que la influencia humana haya contribuido a la mayoría de ellas.
- La frecuencia e intensidad de fenómenos de fuertes precipitaciones ha aumentado desde la década de 1950. La influencia humana en el cambio climático ha contribuido a incrementar sequías tanto agrícolas como ecológicas.

Respecto a los futuros climáticos, en cada informe realizado por el IPCC, se consideran un conjunto de posibles escenarios en base a factores como los escenarios de emisiones previamente comentados.

En el caso del AR6 (2021), se evalúa la respuesta climática para cinco escenarios de emisión ilustrativos que cubren un amplio rango de evolución futura de impulsores antropogénicos del cambio climático. Los escenarios se denominan SSPx-y, donde “x” se refiere a la trayectoria socioeconómica compartida (SSP en sus siglas en inglés) e “y” al nivel aproximado de forzamiento radiativo alcanzado en el año 2100. Las emisiones varían entre escenarios según los supuestos socioeconómicos, los niveles de mitigación del cambio climático y los controles sobre la contaminación del aire debida a los aerosoles y precursores de ozono distintos del metano.

Se considera un conjunto de cinco nuevos escenarios ilustrativos de emisiones para explorar la respuesta climática a una gama más amplia de futuros gases de efecto invernadero (GEI), usos del suelo y contaminantes atmosféricos que los evaluados previamente.

En el escenario SSP5-8.5 se plantean emisiones muy altas, en el escenario SSP3-7.0 emisiones altas, en el escenario SSP2-4.5 emisiones medias, en el escenario SSP1-2.6 emisiones bajas y en el escenario SSP1-1.9 emisiones muy bajas.

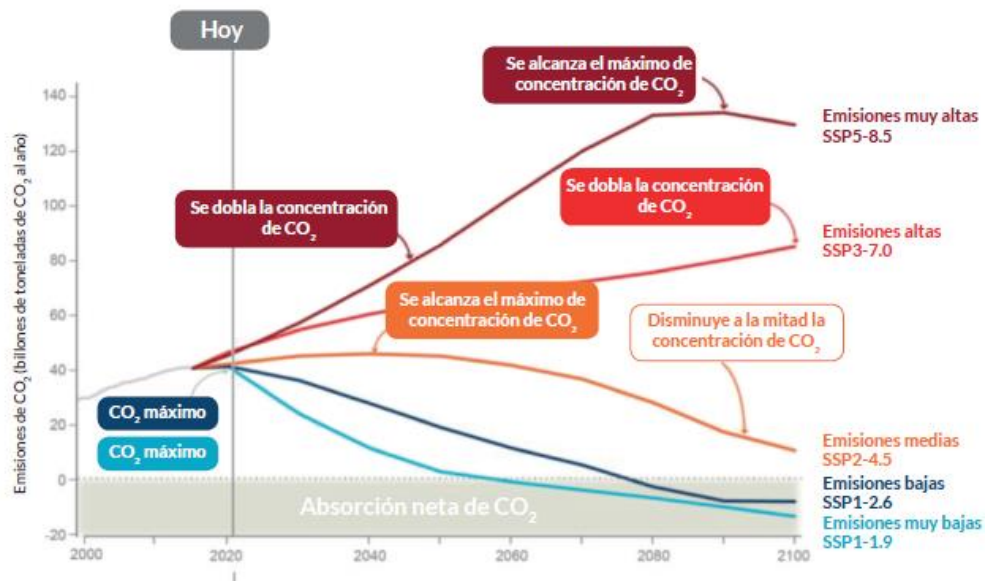


Figura 8. Escenarios de emisiones futuras. Fuente: Informe Grupo I de Trabajo del IPCC AR6 (2021).

En el caso del AR5 (IPCC, 2014), para realizar las proyecciones de emisiones y concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero basadas en estos factores, se utilizan trayectorias de concentración representativas (RCP). Se consideran cuatro trayectorias distintas que incluyen: un escenario de mitigación estricto (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de estos gases (RCP 8.5). En todos los escenarios la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera será mayor en 2100 que en la actualidad como consecuencia del aumento de las emisiones acumuladas durante el siglo XXI.

El informe AR5, al disponer del informe de síntesis publicado desde 2014, se trata de un informe ampliamente estudiado y a partir del cual, importantes organismos nacionales respecto al cambio climático han realizado sus modelos de previsiones, como es el caso el Instituto de la Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, también denominado por sus siglas IH Cantabria, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, o el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, también denominado por sus siglas MITECO.

En todas las variables climáticas tratadas se evidencian efectos del cambio climático inequívocos. Cabe destacar que el cambio climático no afecta a todas las regiones del planeta del mismo modo, cada una tiene sus condiciones y condicionantes especiales, pero previo al estudio de una región en específico, es importante conocer como el cambio climático está afectando a nivel global.

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera (Valencia).



### 3.4 Cambio climático en el litoral valenciano

La costa valenciana es el tramo litoral que pertenece a la Comunidad Valenciana, a orillas del Mar Mediterráneo, situado al este de la península ibérica. El clima valenciano se encuentra, por tanto, directamente relacionado con el clima en el Mar Mediterráneo.

El Mar Mediterráneo se encuentra confinado entre el Sur de Europa, Norte de África y Oriente Medio, conectado al Océano Atlántico por medio del Estrecho de Gibraltar. La región mediterránea se caracteriza por veranos secos e inviernos húmedos, convirtiéndola en una zona muy sensible al cambio climático. Las influencias del hombre sobre el medio marino como pueden ser la concentración de la población en las zonas costeras, la pesca masiva, los impactos agrícolas, el sector industrial, el turismo y el tráfico marítimo también afectan de manera directa al clima marítimo. El cambio climático se suma a los impactos mencionados, pudiendo ser una amenaza para las condiciones físicas y químicas del Mediterráneo, además de las condiciones ambientales de los seres vivos que viven en este (Vargas-Yáñez et al., 2010).

Si se compara la profundidad de los océanos del planeta con la del Mediterráneo, se entiende la delicada situación que sufre este mar al estar expuesto al calentamiento global, ya que se trata de un mar con un menor volumen que el resto de los océanos por los que los calentamientos y efectos de este se producen a mayor velocidad que para el resto de los mares. El mar Mediterráneo tiene una profundidad media de 1500 metros mientras que los océanos pueden tener hasta 4000 metros de profundidad media.

Por otro lado, el balance de calor y salinidad en el mar Mediterráneo se encuentra en balance restringido ya que al tratarse de un mar semicerrado los flujos de intercambio de sal y temperatura se producen con el océano Atlántico de manera limitada a través del Estrecho de Gibraltar.



**Figura 9. Mar Mediterráneo. Fuente: Wikipedia (2022).**

Según informes del Instituto Español de Oceanografía, los cuales analizan datos oceanográficos y atmosféricos desde 1948, a partir de esa fecha se han alternado dos períodos claramente diferenciados. Desde 1948 hasta mediados de los años 70 se produjo un descenso de la temperatura del aire y la temperatura superficial del Mar Mediterráneo. Desde mediados de los 70 hasta la actualidad ha cambiado esta tendencia con un fuerte ascenso de las temperaturas. El aumento de las temperaturas también se produjo para las capas intermedias y profundas del mar.

El aumento de la salinidad refleja la disminución de las precipitaciones en el Mediterráneo, así como la disminución del aporte de los ríos debido a las obras hidráulicas llevadas a cabo en sus cauces.

Respecto al nivel del mar, sufrió una ligera disminución en el Mediterráneo desde los años 50 hasta mediados de los 90. Ello fue debido a un anómalo ascenso de la presión atmosférica. El descenso de ésta desde mediados de los años 90 y la aceleración del aumento de las temperaturas en la misma década coinciden con un acusado aumento del nivel del mar de entre 2.5 mm/año y 10 mm/año. Los datos disponibles sugieren que, además del calentamiento de las aguas, otros factores como el aumento de la cantidad de masa de agua pudieran ser responsables de esta aceleración del ritmo de ascenso del nivel del mar (Vargas-Yáñez et al., 2010).

Para el planteamiento de actuaciones sobre el litoral mediterráneo, por tanto, resulta de gran trascendencia, dimensionar estas actuaciones en base a las previsiones estimadas de afección del cambio climático sobre el clima marítimo.

A continuación, se muestran las proyecciones sobre algunos de los fenómenos climáticos de mayor importancia en el estudio del cambio climático, el nivel del mar, el oleaje y el viento. Estas proyecciones son obtenidas gracias al visor C3E del IH Cantabria, financiado por el Gobierno de España, el cual se basa en los escenarios planteados por el IPCC en su Quinto Informe de Evaluación (AR5).

Las proyecciones son generadas para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, tratándose estos de un escenario moderado y otro representativo de altas emisiones de gases de efecto invernadero, respectivamente.

## NIVEL DEL MAR

En los mares que bañan la costa española, el nivel medio del mar, analizado en los últimos 60 años con la reconstrucción de observaciones, muestra una tendencia ascendente generalizada, con un valor aproximado de 1,5 mm/año en el Mar Mediterráneo, y a lo largo del siglo XXI la tendencia en el nivel del mar en las costas españolas se pronostica en aumento.

En ambos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, la subida del nivel medio del mar para el período comprendido entre 2081-2100 en el litoral valenciano es inequívoca.

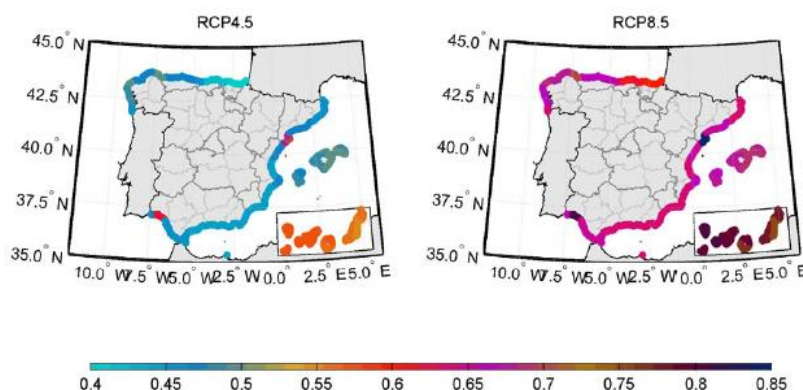


Figura 10. Proyecciones del nivel medio del mar local (m) en el período 2081-2100 (con respecto al período 1986-2005) para los escenarios RCP4.5 (izquierda) y RCP8.5 (derecha) en las costas españolas incluyendo la subsidencia natural del Delta del Ebro. Fuente: IH Cantabria (2014).



## OLEAJE Y VIENTO

El oleaje es la respuesta de la superficie del mar a las variaciones en las condiciones atmosféricas. Cuando se produce una tormenta y soplan fuertes vientos, éstos transmiten energía al mar generando oleaje. Se diferencia entre oleaje de viento o tipo *sea*, y el denominado mar de fondo o tipo *swell*.

El oleaje es un proceso bastante complejo de estudiar, generalmente se utilizan parámetros agregados que lo caractericen como la altura de ola, el período o la dirección.

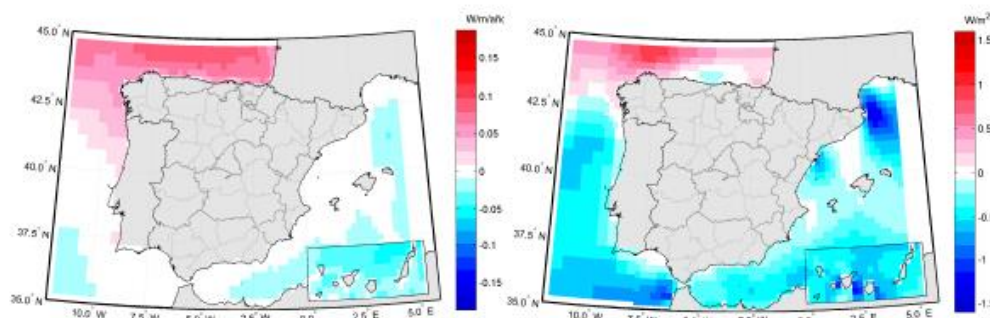


Figura 11. Tasa de cambios observados en el flujo medio de energía del oleaje (izquierda) y la potencia eólica (derecha) en los últimos 60 años. Fuente: IH Cantabria (2014).

Como puede observarse en la figura, no se aprecian cambios significantes en el flujo medio de energía del oleaje, y en la zona de la Costa de Valencia, la potencia eólica apenas sufre variación.

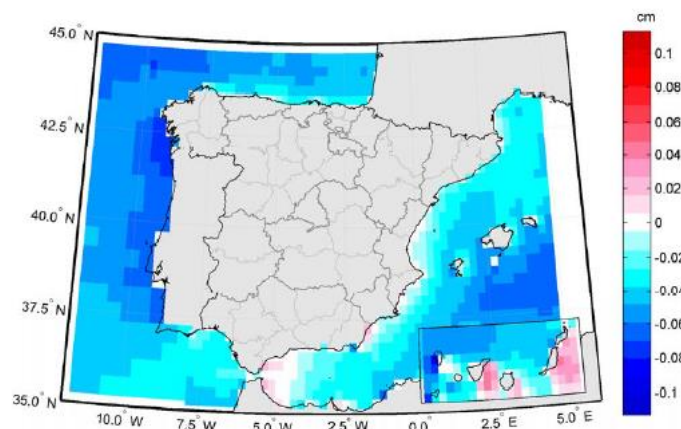


Figura 12. Proyecciones de altura de ola media para el escenario A1B en el período 2070-2100. Fuente: IH Cantabria (2014).

Las proyecciones de altura de ola media en el período 2070-2100 para el litoral valenciano no muestran un aumento en los valores de esta, es más, se prevé una tenue disminución.

### 3.4.2 Factores antropogénicos de cambio

Los sistemas costeros están sujetos a una serie de factores de tipo no climático que pueden interaccionar con los climáticos potenciando los impactos. Fundamentalmente, los factores no climáticos están asociados a presiones de tipo humano, pero también existen de manera natural, como es el caso de la subsidencia.

Las zonas costeras albergan algunos de los ecosistemas más ricos y valorados del planeta. Sin embargo, algunos de ellos son también los más degradados debido al aumento de la presión urbana. Junto al aumento de la población en las zonas costeras se desarrollan numerosas actividades, tanto en mar como en tierra, que pueden impactar negativamente o amenazar los ecosistemas costeros.

En el caso de la costa valenciana, la presión urbanística ha crecido fuertemente durante las últimas décadas y consecuencia de ello, es que se trata de una de las costas españolas más erosionadas o dañadas.

Entre los factores antropogénicos de cambio cabe destacar por ejemplo la hipoxia, el desvío de caudales de agua dulce, el caso más claro y que afecta a la costa valenciana es el río Ebro. Sobre su cauce se encuentran construidos numerosos embalses para el abastecimiento y aprovechamiento hidroeléctrico, necesarios para garantizar el regadío en ciertas zonas de la Comunidad Valenciana, por ejemplo. Otra consecuencia de la actividad humana es la pérdida de hábitat debido al desarrollo costero y urbanístico, como el caso de La Albufera de Valencia, tanto por causas naturales como por presiones de tipo agrícola y urbanístico. El humedal cuenta hoy con un 10% de su tamaño original, tratándose este de una cifra alarmante.

La retención de sedimentos es otro factor de gran importancia, Los hábitats costeros dependen de un balance dinámico de entrada y salida de sedimentos para su buen funcionamiento, pero las actividades humanas pueden amenazar estos sistemas tanto aumentando como disminuyendo el balance final (Crain et al. 2009).

Todo ello tiene consecuencias asociadas: la zona litoral situada en el mediterráneo español es la peor conservada del país: el 32% de la costa tiene críticos niveles de degradación ambiental, el 51% de las playas urgen de alguna actuación de restauración, el 70% de las dunas están destruidas o muy deterioradas, el 60% de los ambientes de transición requieren de alguna actuación, el 40% de esa costa está ya urbanizada y el 16%

es ya costa artificial, y finalmente el 57% de las playas están ya en entornos urbanizados (Ministerio de Medio Ambiente, 2007).

### 3.4.3 Impactos observados en la costa

Todos estos efectos y factores descritos como son el aumento de la temperatura del mar, el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub>, el aumento del nivel del mar o los cambios en los patrones de tormentas son los causantes de una serie de impactos.

Los principales impactos sobre el litoral mediterráneo peninsular y valenciano son la inundación costera, erosión y la intrusión salina. La pérdida de playas (y de su hábitat) debido a la subida del nivel del mar puede deberse fundamentalmente a los impactos de inundación y erosión (IH Cantabria, 2014).

Los cambios en la tasa de erosión costera pueden ser originados por el aumento del nivel del mar o por el cambio en la dirección media del oleaje. Además, cambios en el transporte de sedimentos, variable principal objeto de estudio en el presente trabajo, potencian las zonas de erosión o acreción.

## INUNDACIÓN

Se habla de inundación en la costa cuando se supera un determinado nivel al que llegan habitualmente las aguas y se generan daños, bien en el sistema natural o en el sistema socioeconómico.



Figura 13. Porcentaje de cambio en la cota de inundación para el año 2040. Fuente: IH Cantabria (2014).

Como se observa en la figura 13, se prevé un aumento en la cota de inundación para el año 2040 en la costa valenciana, de entorno al 2%.

## RETROCESO EN LA LÍNEA DE COSTA

La artificialización desmesurada de la costa en las últimas décadas ha desencadenado la erosión de la costa en amplias zonas.

Las estructuras costeras como diques, espigones o paseos marítimos y el desarrollo urbanístico sobre complejos dunares que impiden el movimiento del sedimento a lo largo de la línea de costa, o simplemente cortan el transporte de sedimentos han dado lugar a procesos erosivos acelerados como los que ocurren en la zona de Levante.

El proceso de erosión o acreción en la costa dependerá fundamentalmente de los cambios en el nivel medio del mar, cambios en la dirección del oleaje y cambios en el transporte de sedimentos.

Asumiendo simplificaciones se llega a la siguiente proyección de retroceso en las playas medio de cerca de 2 metros. Sin embargo, tras el estudio de la evolución del transporte de sedimentos para el tramo comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera, las previsiones de retroceso en la línea de costa son ampliamente superiores a las estimadas por el IH Cantabria.



Figura 14. Retroceso en playas debido a la subida del nivel del mar en el año 2040. Fuente: IH Cantabria (2014).

### 3.5 Incertidumbres y necesidades de información

Los modelos de proyección de variación de las distintas variables climáticas consisten en situaciones hipotéticas generadas a partir de escenarios futuros de emisión de gases de efecto invernadero. En función del escenario escogido para el estudio de los datos, se producirá cierto aumento o disminución en la variable a caracterizar, contando con una diferencia significativa entre los resultados obtenidos. Este hecho lleva asociada una incertidumbre a los propios escenarios.

Las conclusiones publicadas por la comunidad científica respecto a los cambios en oleaje y tormentas para los nuevos escenarios **SSP** y **RCP** son todavía poco concluyentes, y, por tanto, llevan asociada mucha incertidumbre.

A nivel nacional, la disponibilidad de bases de datos de gran detalle es también limitada, sobre todo respecto a variables complejas de estudio como es el caso del transporte sólido litoral.

Es por ello, que se requiere de un aumento en la precisión de los modelos de predicción, debido a las enormes consecuencias que el cambio climático puede traer, especialmente sobre las actividades costeras como la pérdida de playas o la pérdida de operatividad en puertos, con las elevadas consecuencias económicas y sociales asociadas.

Fruto de ello, nace el objetivo del presente trabajo: el desarrollo de un modelo que determine los efectos de la existencia, o no de cambio climático empleando el análisis de series históricas y que, además sea capaz de generar una proyección a futuro sobre la variable objeto de estudio, específicamente para el año 2040 de la capacidad de transporte sólido litoral, de modo que se pueda realizar una propuesta de actuación sobre un tramo de la costa, en este caso el correspondiente entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera, anticipándose a las consecuencias del cambio climático.

## 4. Métodos para verificar el cambio de las variables climáticas

En el presente capítulo se realiza una revisión de los antecedentes que han dado lugar a la realización del presente trabajo de final de grado. El objetivo principal de este apartado es la evaluación de la diferente metodología empleada para determinar la existencia o no de cambio climático hasta la fecha, estudiando la variación de diferentes variables climáticas, así como de la metodología empleada para generar proyecciones climáticas a futuro.

En primer lugar, respecto al estudio de los datos históricos que permiten determinar la existencia de cambio climático hasta la fecha, existen distintos modos mediante los que se han estudiado históricamente los mismos, modelos basados en análisis de tendencias, así como de su significancia:

- Brunet et al. (1999), estudiaron las series temporales correspondientes a los promedios mensuales de las temperaturas máximas y mínimas diarias de un amplio grupo de observatorios meteorológicos del NE de España.

Se construyó una base de datos homogeneizada mediante la aplicación de la prueba SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) (Alexandersson y Moberg, 1997). Estas series de datos homogeneizadas fueron convertidas en series de anomalías absolutas, y combinadas, para obtener promedios espaciales representativos de la región objeto de estudio (Cataluña).

De los promedios mensuales de las temperaturas máximas y mínimas diarias se calcularon las medias estacionales y anuales, con las que se examinaron las variaciones y tendencias térmicas registradas por ambas variables en la región de estudio para el período 1913-1998.

A partir de los promedios mensuales de la amplitud térmica, se calcularon las medias estacionales y anuales de la ATD (amplitud térmica diaria), siendo suavizadas con un filtro simple consistente en el cálculo de una media móvil de siete años, que tiende a suavizar variaciones interanuales de su tendencia lineal simple. Para determinar los puntos de cambio en la tendencia anual y contribuir a caracterizar subperíodos de variación térmica, se implementó el método de regresión en dos fases utilizado por Solow para detectar cambios abruptos en la tendencia de una serie temporal.



- Cañada et al. (2001) también evaluaron las variaciones y tendencias de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales durante el siglo XX (1909-1996), empleando una metodología consistente en determinar la tendencia general y parcial de las series a través de la aplicación de los **test no paramétricos** de Spearman y Mann-Kendall, y en cuantificar esa tendencia mediante la **regresión lineal simple**. Del mismo modo que los autores anteriores, tras la elección de las estaciones de datos, se homogeneizaron los registros mediante la aplicación de la prueba SNHT (Alexandersson y Moberg, 1997), también suavizaron los datos mediante el empleo de medias móviles de siete años y cuantificaron el valor de la tendencia general y parcial mediante la regresión lineal simple entre los valores de las temperaturas máximas y mínimas y el año.
- Liste et al. (2005) evaluaron las tendencias hiperanuales de los parámetros medios de oleaje utilizando una base de datos simulados numéricamente, obtenida a partir del Modelo Espectral de Oleaje WAM, a partir de un análisis retrospectivo de oleaje de un período de 44 años. A partir de parámetros representativos definieron el vector de flujo medio de energía en profundidades indefinidas, como la tasa media de transferencia de energía por unidad de anchura a través de un plano  $x=cte$ . Mediante la **regresión lineal** y una prueba de localización de outlier, se obtuvo el resultado del ajuste de las series de datos, tratando de interpretar la significancia de la tendencia mediante los intervalos de confianza.
- Martínez et al. (2014), ante la falta de precisión en los modelos de circulación general consideraron indispensable avanzar en el análisis de series de tiempo climático. Para ello, utilizaron diversos métodos en el análisis de tendencias de series de datos climáticos tales como la correlación lineal (v.g. McCabe & Wolock, 1997) y las técnicas de correlación serial. En años recientes, se usaron métodos de estimación no paramétricos tales como el Mann Kendall y la prueba Rho de Spearman, la cual brinda resultados consistentes con la de Mann-Kendall.
- Respecto a los test no paramétricos, para la detección de tendencias en los datos climáticos, muchos autores optaron por utilizar métodos como el test de Mann-Kendall. Esta prueba no se ve afectada por la presencia de valores atípicos y no presupone normalidad en la distribución de los datos, por lo tanto, es válida para cualquier tipo de distribución. Esta prueba ha sido utilizada anteriormente para poder detectar tendencias en series climáticas.

Respecto a cómo los distintos organismos están generando escenarios de proyecciones futuras, respecto a la metodología o modo de estudio de los datos empleado destaca:

- Medina et al. (1992) presentaron un simulador para describir el comportamiento futuro de ciertas variables climáticas modelizando la magnitud de estas mediante el empleo de funciones estadísticas y realizando un análisis de Fourier para discriminar las componentes estacionales más significativas.
- Stanislawska et al. (2012) realizaron una retrospección de la temperatura global mediante modelos evolucionados computacionales. Usaron 60 años de datos históricos de temperatura e impulsores climáticos. Modelan la temperatura usando metodología de programación genética (GP).
- Van Oldenborgh et al. (2012) establecen pronósticos climáticos decadales, investigando la habilidad de los datos históricos de temperatura y precipitaciones a partir de un ensemble multi-modelo de cuatro sistemas de pronóstico basados en modelos acoplados océano-atmósfera extraídos del IPCC.
- Hochet et al. (2021) emplearon modelos de reanálisis en escalas multi-decadales empleando modelos numéricos de reanálisis tales como ERA-5, siendo esta la quinta generación de modelos de reanálisis proporcionados por el ECMWF, denominado en castellano como Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio.
- En la actualidad, los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) permiten la investigación del clima, sus fluctuaciones y variaciones. Estos modelos se consideran como una representación numérica basada en propiedades físicas, químicas y biológicas de los componentes del sistema climático, sus interacciones y procesos de retroalimentación (IPCC 2001). Actualmente, los MCG incluyen modelos de funcionamiento de los océanos denominados Modelo de Circulación General Atmósfera-Océano (AOGCM), que se integran en todo el planeta en escalas espaciales y temporales razonablemente amplias, en rejillas de decenas a cientos de kilómetros. Estos modelos globales proporcionan características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas debido a su baja resolución.
- Por otro lado, la evolución del sistema climático está condicionada por el comportamiento humano, aspecto que no está contenido en los modelos globales.



Por ello se recurre a escenarios alternativos de emisiones que tienen en cuenta dicho comportamiento mediante las emisiones de gases de efecto invernadero, las emisiones de aerosoles, cambios de uso de suelo, la demografía, etc. Estos escenarios de emisiones se integran con los AOGCM y permiten conocer las posibles variaciones futuras del clima en los supuestos de los diferentes escenarios de emisiones contemplados.

- Además de los modelos climáticos enfocados en generar escenarios de emisiones, otro modo de realizar previsiones en el campo de estudio del clima marítimo es el *hindcasting* o retroanálisis, consistente en la previsión de oleaje a partir de datos históricos. Para ello, se comprueba que los datos históricos obtenidos son fiables comparándolos con información conocida y verificada. Los datos de oleaje y viento en *hindcasting* permiten disponer de bases de datos homogéneas contrastadas con datos instrumentales. En el presente trabajo, se ha empleado metodología basada en el tratamiento de datos históricos de oleaje o *hindcasting*.
- Muchos autores se limitan a realizar predicciones basadas en la información proporcionada por el IPCC como los modelos CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), también denominados en castellano como Proyecto de Inter-Comparación de Modelos de Clima Acoplados.

El análisis de tendencias en los datos climáticos, así como la elaboración de pronósticos futuros de variación de estos, es un tema que se lleva décadas investigando y estudiando. Como ha sido constatado, en función del autor se emplea una metodología u otra, no disponiendo ninguna de una validez absoluta y siendo la cantidad de metodología empleada muy distinta.

En el desarrollo del presente apartado, se ha demostrado la existencia de una gran incertidumbre respecto al tratamiento de los datos climáticos y es por ello por lo que, en el presente estudio se ha optado por generar modelos de evaluación de tendencias de datos climáticos, así como pronósticos, mediante el empleo de técnicas analíticas y estadísticas similares a las empleadas por Medina et al. (1992), así como por medio de la técnica de la regresión lineal simple, tratándose esta última, de una técnica ampliamente estudiada y validada a nivel global.

## **5. Evaluación de las variables climáticas en la zona de Valencia**

No existe hoy en día una metodología universalmente empleada para el estudio de la evolución de las variables climáticas y, por tanto, determinación de la existencia o no de cambio climático.

En el presente apartado, se desarrolla una metodología de estudio de distintas variables climáticas empleando para ello series históricas de datos respectivos a la temperatura y el oleaje (retroanálisis) en la costa de Valencia, específicamente en el tramo comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera.

Esta metodología se conforma de una serie de pasos, mediante los cuales es posible realizar un análisis de la evolución del clima marítimo.

En primer lugar, se estudia la evolución de la temperatura, y posteriormente la evolución de la capacidad de transporte sólido litoral.

### **5.1 Fuentes de información climática**

Previo al análisis de series históricas de un conjunto de datos, se debe disponer de los mismos. Idealmente, estos datos deben provenir de fuentes de información validadas con un alto nivel de confianza.

Existen distintas fuentes de información, las cuales proporcionan datos históricos. Para el estudio en el presente trabajo, se han optado por las siguientes:

#### **5.1.1 Temperatura**

La temperatura se trata de la variable climática más ampliamente estudiada a la hora de modelizar el cambio climático, y de la cual se dispone de datos desde hace centenares de años, de una gran cantidad de fuentes distintas. Se trata de una variable que determina si un sistema se encuentra en equilibrio o no respecto a otros sistemas.

En el presente trabajo, la temperatura se caracteriza por medio de la temperatura máxima diaria.

Para la obtención de las series históricas de datos de temperatura, se escoge como fuente de información, NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER), respaldada por Earth Science Applied Sciences, organismo que proporciona ayuda a las principales instituciones climáticas a tomar decisiones sobre el planeta.

El proyecto Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) fue iniciado para mejorar el conjunto de datos actual de energías renovables y para crear nuevos conjuntos de datos desde nuevos sistemas de satélites.

La resolución horizontal de las fuentes de datos meteorológicos es de  $0,5^\circ \times 5^\circ$  de latitud/longitud.

Los parámetros meteorológicos se derivan del modelo de asimilación GMAO MERRA-2 de la NASA y GEOS 5.12.4 FP-IT.

MERRA-2 es una versión del Sistema de Asimilación de Datos del Sistema de Observación de la Tierra Goddard (GEOS) de la NASA (Bosilovich, M.G., et al. 2016). El equipo del proyecto POWER procesa los datos de GEOS 5.12.4 diariamente y los agrega al final de la serie temporal diaria de MERRA-2 para proporcionar productos de baja latencia que generalmente están listos en aproximadamente 2 días en tiempo real. Los valores de MERRA-2 en la serie temporal diaria resultante se actualizan típicamente cada varios meses.

El proyecto POWER tiene un enfoque anidado para el procesamiento de datos temporales. Los datos meteorológicos y solares iniciales están a nivel horario y se utilizan para crear datos diarios (UTC y hora local).

Para el estudio de la temperatura máxima frente a la Costa de Valencia, se deciden escoger los datos para una latitud  $39.50^\circ$  N y longitud  $0.00^\circ$  E, con una elevación de 2 metros sobre el nivel del mar.

El período de datos disponibles comprende desde enero de 1982 hasta noviembre de 2021, es decir, se dispone de una batería total de 39 años.

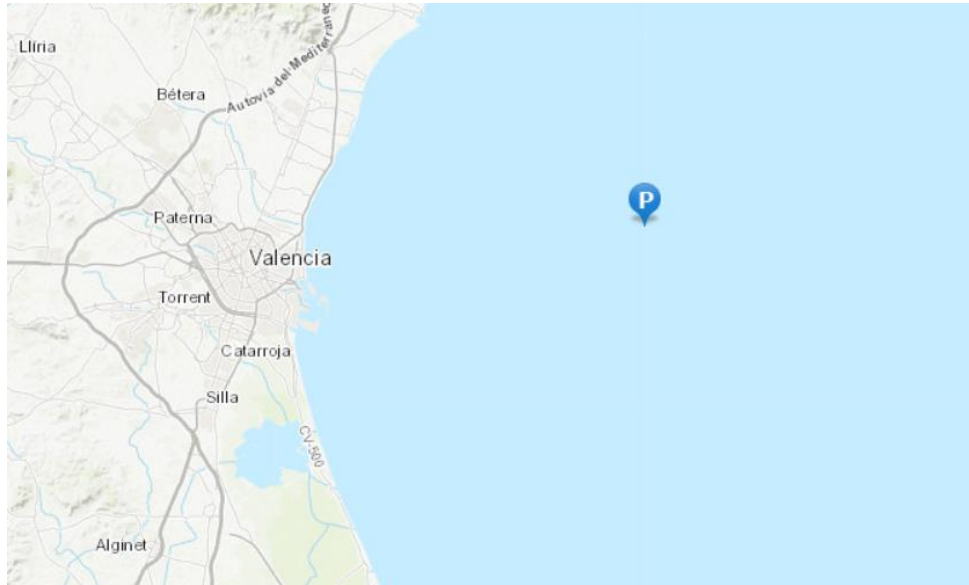


Figura 15. Localización punto latitud 39.5° N longitud 0.0° E. Fuente: NASA Power Data Access Viewer (2021)

### 5.1.2 Oleaje

La información sobre el clima marítimo es posible obtenerla de diferentes maneras según el instrumento o metodología empleada. Existen tres grupos de fuentes de información: visuales, instrumentales y numéricas (modelos).

Las fuentes basadas en la vista consisten en realizar estimaciones de oleaje desde barcos, contando con una distribución heterogénea. Estos datos normalmente se toman siguiendo rutas de navegación, existiendo también la opción de su empleo en barcos meteorológicos o en estructuras off-shore.

Las medidas instrumentales se tratan de las más precisas, empleando para ello utensilios específicos. Existe una distinción dentro de esta tipología entre si el aparato para el registro de datos se encuentra en el mar (in situ) o no (remotos o satélites).

Por último, los modelos numéricos, son aquellos que emplean las matemáticas y la física para obtener información sobre el oleaje, la cual es posible calibrar y llevar a la realidad.

El oleaje se trata de una onda que se desplaza por la superficie de mares y océanos, sin embargo, se diferencia de las ondas teóricas en que, a pesar de conocer una onda de ola, es impredecible cómo será la forma de la siguiente. Por lo tanto, la altura de ola es una variable aleatoria que cambia a lo largo del tiempo.

Los parámetros que caracterizan el oleaje son la altura de ola significativa ( $H_s$ ), período pico ( $T_p$ ) y dirección del oleaje ( $\theta$ ). Estos se obtienen del espectro del oleaje y se utilizarán para el estudio de la capacidad de transporte sólido litoral.

Para el tratamiento de datos de oleaje, se decide trabajar con las series de datos históricas proporcionadas por el organismo Puertos del Estado, por medio del conjunto de datos SIMAR. Este organismo ofrece entre otros temas, información sobre la oceanografía contando con una red de boyas, mareógrafos y radares de alta frecuencia alrededor de toda la Península Ibérica, Islas (Baleares y Canarias), Ceuta y Melilla. Se proporcionan datos a tiempo real e históricos. Las redes de boyas se dividen en las de aguas profundas y las costeras.

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad. Se decide trabajar con el período de tiempo 1958-2021.

Para el área mediterránea se ha utilizado una malla de espaciado variable con una resolución de 15' de latitud x 15' de longitud (unos 25 Km x 25 Km).

En este presente trabajo, se decide escoger el punto SIMAR 2084114, situado frente a la línea de costa de la ciudad de Valencia, en aguas profundas, con una latitud 39.50° N y una longitud 0.00° E. Se trata del mismo punto cardinal empleado para la extracción de datos de temperatura.

El período de datos comprende desde enero de 1958 hasta diciembre de 2021, es decir, se dispone de una batería total de 63 años.

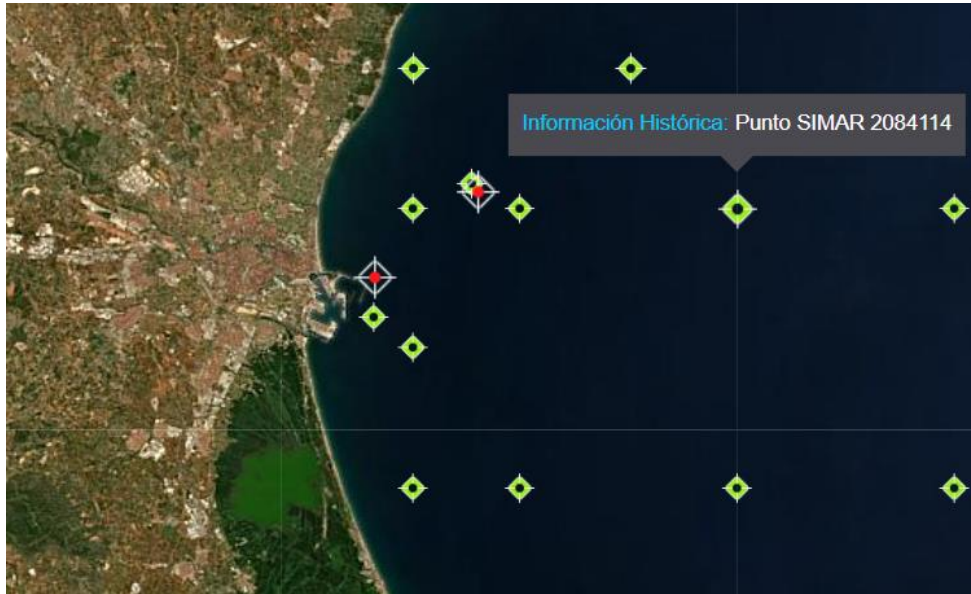


Figura 16. Localización punto SIMAR 2084114. Latitud 39.5 °N Longitud 0.0 °E. Fuente: Puertos del Estado (2022)

## 5.2 Metodología de trabajo

### 5.2.1 Introducción

La propuesta metodológica a desarrollar en este capítulo permite realizar un tratamiento estadístico-matemático de series históricas de datos climáticos (retroanálisis) con el objetivo de analizar la evolución de los datos debida al cambio climático, mediante la modelización de dos variables distintas: temperatura máxima y transporte sólido litoral.

En primer lugar, la metodología se aplica a las series históricas de datos disponibles de temperatura, con el objetivo de evaluar la tendencia existente en estos y compararla con la tendencia plasmada por los principales organismos climáticos.

Posteriormente, se aplica el mismo procedimiento al tratamiento de los datos correspondientes a la capacidad de transporte sólido litoral, es decir, la capacidad de transporte de sedimentos, empleando para ello, los datos históricos de oleaje como la altura de ola significativa y dirección de procedencia.

Para el desarrollo de esta metodología se ha recurrido a los programas de trabajo Microsoft Excel 2021 y Matlab 2021, los cuales permiten el tratamiento estadístico y matemático de un gran conjunto de datos mediante la elaboración de códigos de trabajo.

La propuesta empleada para el análisis de tendencias de los datos consta de distintas fases:

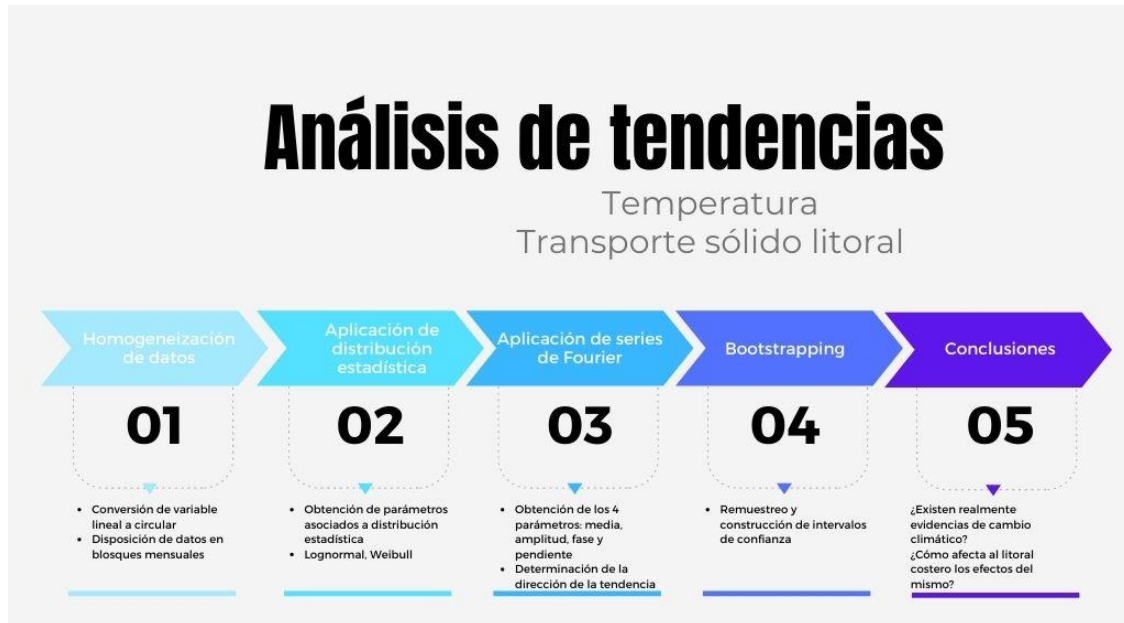


Figura 17. Fases que componen la metodología de trabajo basada en el análisis de tendencias. Fuente: elaboración propia.

### 5.2.2 Homogeneización de los datos

Se trabaja en bloques de datos mensuales, lo cual requiere un previo tratamiento de los datos extraídos de las distintas fuentes de información de forma horaria o diaria (Medina et al., 1992).

Para el tratamiento de los datos se realiza una conversión de una variable lineal a circular, por tanto, la información que se disponga bien en horas, bien en días, debe transformarse a una medida de ángulos, siendo 1 año equivalente a 360°.

Como demuestran Medina y Serrano-Hidalgo (2004), el objetivo de transformar una variable lineal en una circular es evitar la existencia de saltos en los cambios de año.



Tiempo	Ángulo temporal
1 día	$\approx 1^\circ$
1 mes	$30^\circ$
1 año	$360^\circ$

Tabla 1. Equivalencia a grados temporales. Fuente: elaboración propia.

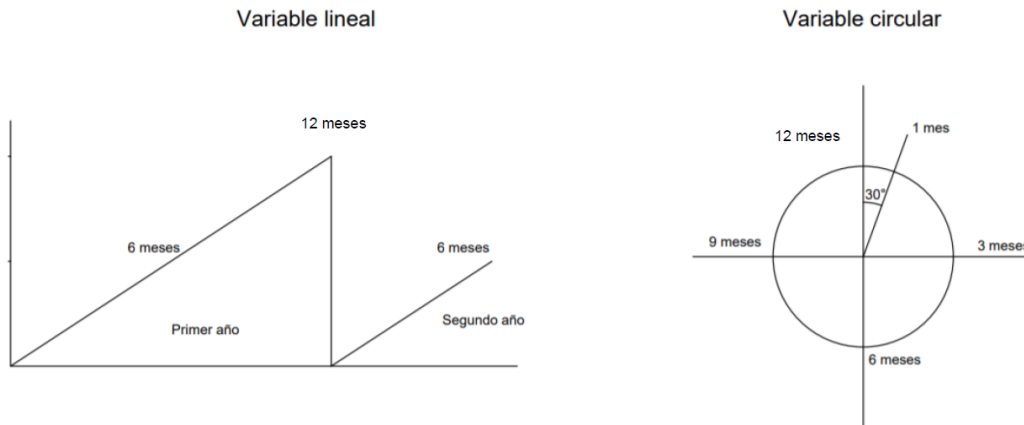


Figura 18. Comparativa entre la variable lineal y circular. Fuente: TFM Alejandro Castellano (2020)

En el caso de la temperatura se dispone datos diarios, por lo que cada ajuste estadístico mensual constará de 30 datos iniciales, siendo 30 el número de días de que dispone un mes.

Respecto a los datos de oleaje, se dispone de datos horarios y cada mes constará de 730 datos iniciales, siendo 730 el número de horas que componen un mes.

Esta homogeneización de los datos se realiza mediante el desarrollo de un código de trabajo en el software Matlab, el cual, además, permite realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, lo cual resulta de gran utilidad para los casos, como en el presente trabajo, en que se emplea una gran cantidad de datos numéricos.

### 5.2.3 Ajuste estadístico mensual

La estadística es la disciplina que intenta sacar conclusiones de estudios empíricos mediante la utilización de modelos matemáticos. Sirve como nexo entre los fenómenos reales y los modelos matemáticos.

De acuerdo con el fin del análisis, se empleará la estadística descriptiva que tiene como fin describir un conjunto de datos. Es decir, recoge, organiza y sintetiza la información, de modo que se pueda tener una idea de las características esenciales de los datos y sacar conclusiones.

Tras la homogeneización de los datos, una vez dispuestos los mismos de manera angular, y agrupados en bloques mensuales, se identifica la distribución estadística que mejor se ajusta al conjunto de los datos (Medina et al., 1992).

La aplicación de una distribución estadística u otra depende de la variable objeto de estudio, temperatura o transporte sólido litoral, así como de la forma del conjunto de datos.

Algunos ejemplos de funciones de densidad de probabilidad son los siguientes:

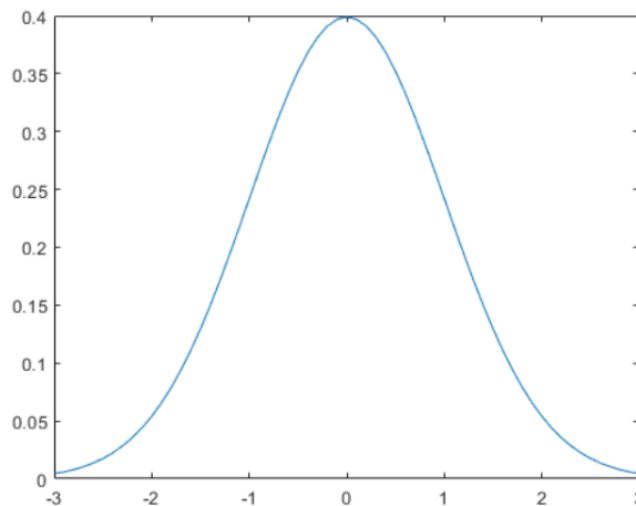


Figura 19. Ejemplo de distribución normal. Fuente: Matlab (2022)

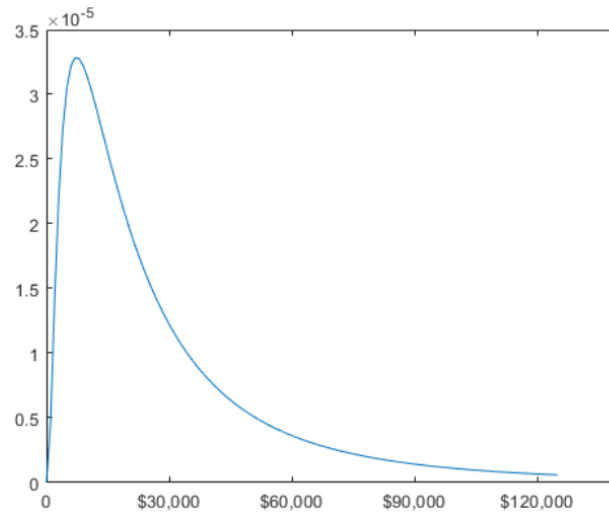


Figura 20. Ejemplo de distribución Lognormal. Fuente: Matlab (2022)

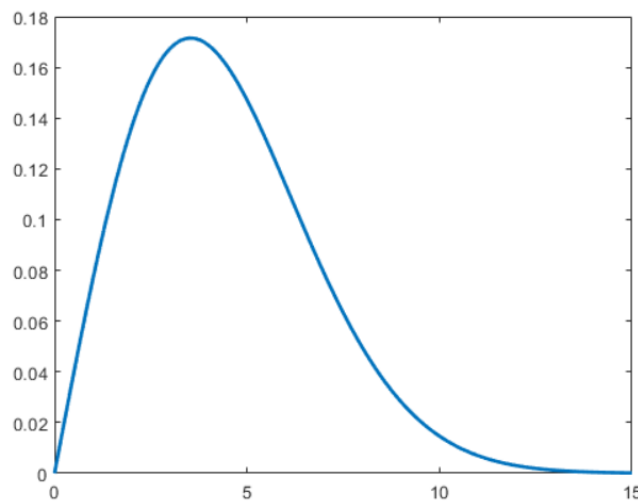


Figura 21. Ejemplo de distribución Weibull. Fuente: Matlab (2022)

De la aplicación de la distribución estadística correspondiente a los conjuntos de datos, se obtienen como resultado, los parámetros asociados a la misma.

Estos parámetros, en el presente trabajo, permiten caracterizar la afección que está teniendo el cambio climático sobre el clima marítimo, permitiendo diferenciar tendencias crecientes o decrecientes sobre los distintos bloques de datos.

En el caso de la temperatura máxima diaria, se aplica la distribución Lognormal, mientras que, para el análisis de la capacidad de transporte sólido litoral, se aplica la distribución Weibull de dos parámetros.

#### 5.2.4 Ajuste de Fourier

El siguiente paso en la metodología desarrollada, consiste en la aplicación de las series de Fourier al conjunto de parámetros obtenidos de la distribución estadística aplicada mensualmente, del mismo modo en que Medina et al. (1992) lo hicieron en el desarrollo del *Wave Climate Simulator*.

Las series de Fourier son una aplicación matemática utilizada para describir cualquier función periódica mediante la descomposición en una suma de funciones simples y sinusoidales (Carrillo, 2003).

En el presente estudio se emplean las series de Fourier debido a que se trata de una potente herramienta para la representación de fenómenos estacionales. En los estudios de evolución de las variables climáticas, por tanto, disponen de una amplia utilidad permitiendo caracterizar las tendencias de los datos para las estaciones de invierno-verano.

La función se puede expresar como una descomposición en una serie armónica infinita:

$$f(t) = C_0 + \sum C_i * \cos(\omega_i t - \Phi_i) + y * t \quad (1)$$

$f(t)$  Función periódica en un instante  $t$  (mensual)

$C_0$  Valor medio de la función  $f(t)$

$C_i$  Amplitud de la onda

$\omega_i$  Frecuencia angular de la onda

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$$

$\Phi_i$  Fase de la onda

$y$  Pendiente

Del análisis de Fourier, se obtienen 4 parámetros: media ( $C_0$ ), amplitud ( $C_i$ ), fase ( $\Phi_i$ ) y pendiente ( $y$ ), representando esta última componente, la evolución creciente o no de la batería de datos disponible y a partir de la cual se determina como está afectando el cambio climático sobre la variable estudiada.

El primer parámetro ( $C_0$ ), representa la media del ajuste de los datos, y el cuarto parámetro ( $\gamma$ ), representa la tendencia ascendente o descendente de esta serie armónica, siendo ambos los parámetros que disponen de mayor relevancia en el estudio de la tendencia de los datos en el presente trabajo.

Del estudio de los parámetros de la amplitud y fase, también es posible extraer conclusiones, sin embargo, en el presente estudio se considera suficiente para la determinación de la dirección de la tendencia, el estudio de la media ( $C_0$ ) y pendiente ( $\gamma$ ).

### 5.2.5 Bootstrapping

El bootstrapping, es un método de remuestreo utilizado para aproximar la distribución en el muestreo de un estadístico. Se utiliza para construir intervalos de confianza o realizar contrastes de hipótesis sobre parámetros de interés. Desde su formulación por Efron (1979) ha llegado a constituirse en el más popular de los procedimientos de remuestreo.

En la presente metodología, el último paso consiste en la aplicación del bootstrapping.

A partir de la muestra original de los resultados del ajuste de la distribución estadística aplicada a cada mes objeto de estudio y ordenados cronológicamente, se extraen mil nuevas muestras de resultados aleatorios con reposición, es decir, tras la extracción de un primer elemento (valor estadístico mensual), este se repone en la muestra original de tal forma que podría ser elegido de nuevo como segundo elemento de la muestra extraída.

Del mismo modo que en la metodología expuesta, se les aplica el análisis de Fourier a cada una de estas nuevas muestras aleatorias, con el objetivo de analizar la tendencia y la posterior creación de intervalos de confianza.

El método bootstrap no representa un estadístico en sí mismo, sino un enfoque sobre cómo usar los estadísticos para hacer inferencias acerca de los parámetros (Liao et al., 1993).

El resultado del bootstrapping se representa por medio de un gráfico empírico acumulativo (ecdf), en el cual se representa el resultado de la primera ( $C_0$ ) o cuarta componente ( $\gamma$ ) del análisis de Fourier para el conjunto de mil series aleatorias, de modo que, disponiendo además en el mismo gráfico del resultado de la componente de Fourier de la muestra original, es posible verificar la hipótesis de existencia de cambio climático.

Para verificar la hipótesis de existencia de cambio climático, se construyen intervalos de confianza en el gráfico empírico acumulativo, de modo que, trabajando con un nivel de significación de 0,05, si el resultado de la muestra original se encuentra entre las bandas de confianza del 5% al 95%, se acepta la hipótesis nula (no hay cambio climático), mientras que, si se encuentra fuera de estos intervalos de confianza, se confirma la hipótesis de existencia de cambio climático.

## 5.3 Aplicación a temperatura

### 5.3.1 Estudio de los datos

En el caso de la temperatura máxima diaria, se dispone de una batería de datos históricos de 39 años (1982-2021) a la que se le aplica cada uno de los pasos de la metodología previamente expuesta.

Al identificar los meses de manera angular (1 mes = 30°), se dispone de un total de 468 meses.

Para el tratamiento de los datos de la temperatura, se aplica la distribución estadística Lognormal. La distribución Lognormal proporciona como resultado dos parámetros, la media ( $\mu$ ) y la desviación típica ( $\sigma$ ), los cuales se agrupan en una matriz de n columnas, asociada cada una de ellas, a un mes.

Para el análisis de tendencias, se estudia la evolución del parámetro media ( $\mu$ ).

La función de distribución y los parámetros de la Lognormal se calculan según las siguientes ecuaciones:

$$p = F(x|a, b) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{(\log t - a)^2}{2b^2}} dt, \quad \text{para } x > 0 \quad (2)$$

$$a = \log \frac{\mu^2}{\sqrt{v + \mu^2}}$$

$$b = \sqrt{\log \left( \frac{v^2}{\mu^2} + 1 \right)}$$

Siendo “ $\mu$ ” y “ $v$ ”, media y varianza de la distribución Lognormal respectivamente.

Posteriormente, una vez se dispone de una matriz de resultados, se aplica el análisis de Fourier sobre el parámetro resultado media ( $\mu$ ), asociado a los 468 meses de datos disponibles.

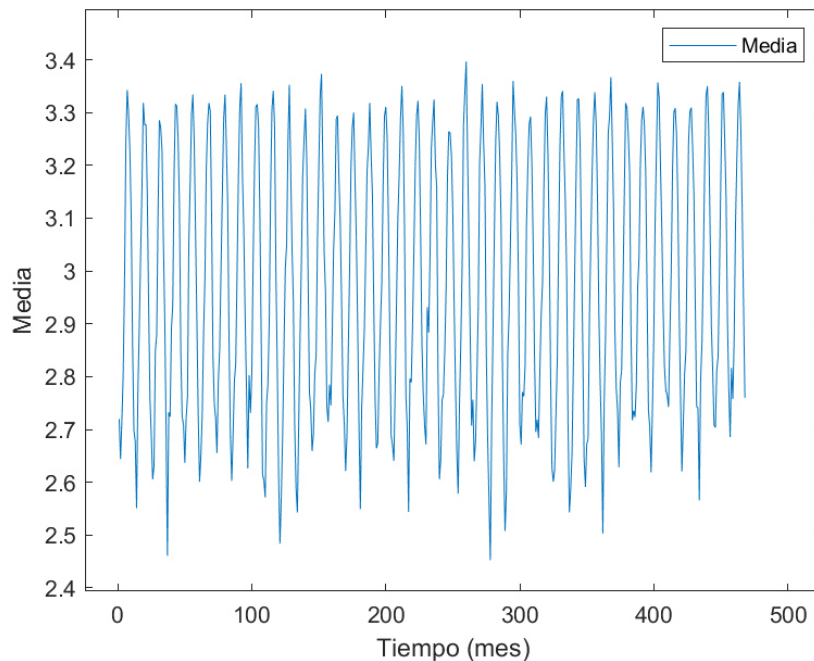
### 5.3.2 Resultados

El estudio de resultados sobre el análisis de la temperatura máxima se centra en la evolución de la media ( $\mu$ ), tratándose este del parámetro que mayor relevancia dispone durante el análisis de la tendencia.

Al aplicar la distribución estadística Lognormal al conjunto de datos, se trabaja con el logaritmo neperiano de los mismos.

#### **MEDIA ( $\mu$ )**

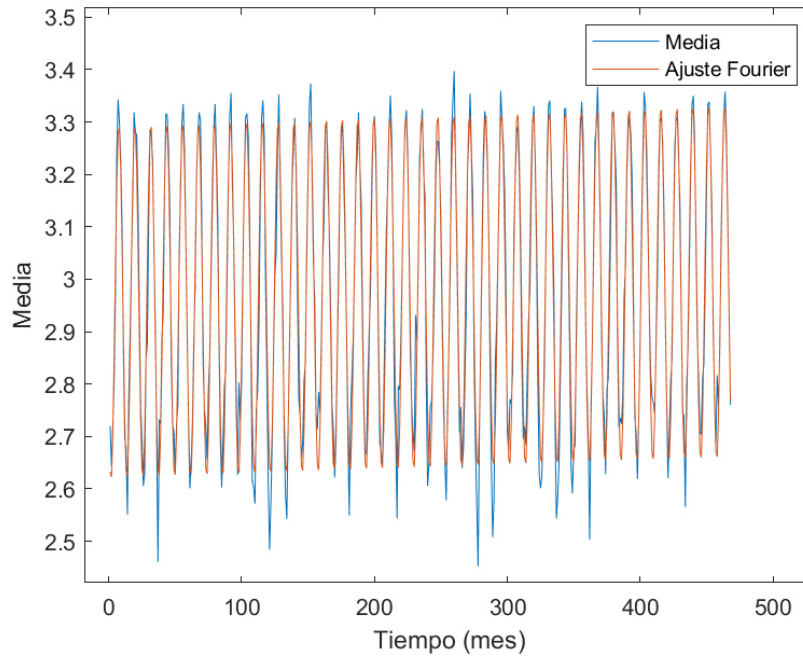
En la siguiente figura se muestra un gráfico en el que se puede observar la media del ajuste Lognormal sobre cada uno de los 468 meses objeto de estudio.



**Gráfico 1. Evolución de la media del ajuste Lognormal de la Temperatura Máxima Diaria. Fuente: elaboración propia en Matlab.**

Sobre el mismo gráfico, se muestra el resultado tras aplicar el análisis de Fourier, en el cual ya es posible analizar la tendencia de los datos, en este caso, creciente.





**Gráfico 2.** Evolución de la media del ajuste Lognormal junto al ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

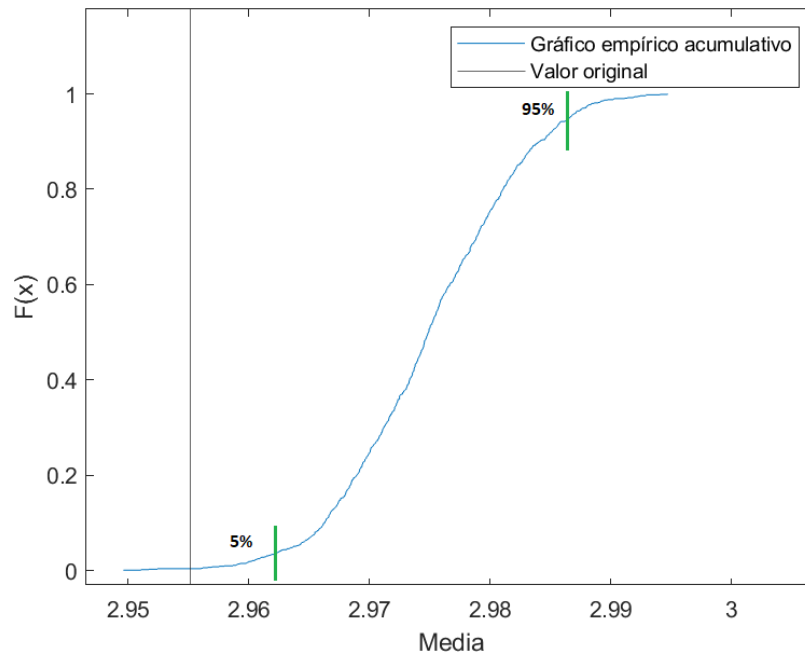
En el gráfico 2, ya es posible observar la tenue tendencia creciente de los datos a lo largo de los 39 años objeto de estudio.

El resultado de la cuarta componente del ajuste de Fourier, correspondiente a la pendiente de la evolución los datos debida al cambio climático, muestra un porcentaje de aumento mensual de 0.00847 % sobre la primera componente (media) del ajuste Lognormal, resultando un aumento total a lo largo de los últimos 39 años de un 4% aproximadamente.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de bootstrapping para la primera y cuarta componente del ajuste de Fourier.

## 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA $C_0$ )

En la siguiente figura, se muestra el gráfico acumulativo tras realizar la prueba de Bootstrapping de la primera componente de Fourier (media), en el que, además, se muestran los intervalos de confianza de la hipótesis de existencia de cambio climático representados en color verde.

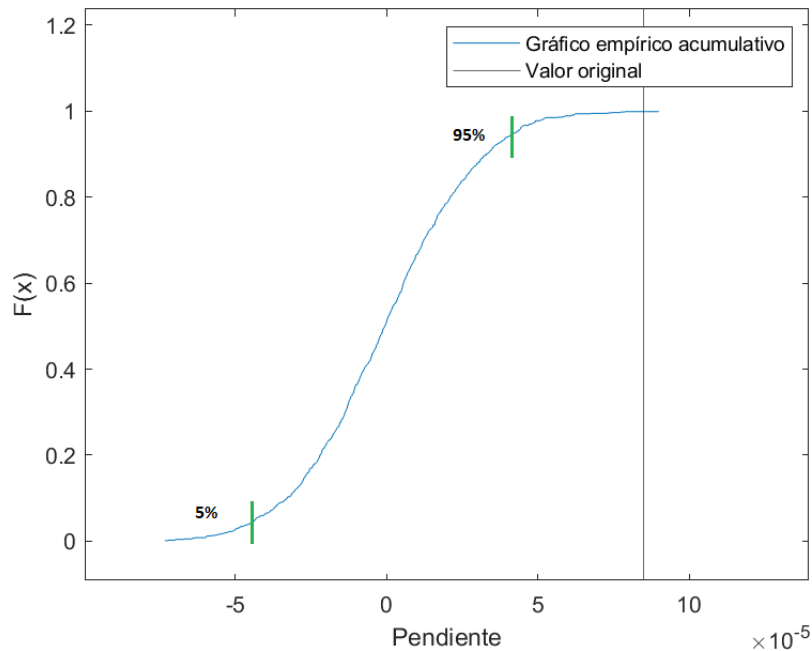


**Gráfico 3.** Gráfico empírico acumulativo de la primera componente del ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Se puede determinar, como el valor original del primer parámetro de la serie de Fourier (media) respecto al gráfico acumulativo de las mil series aleatorias se encuentran en un valor ampliamente inferior al 5 % del total, por lo que se acepta la hipótesis de que existe cambio climático al encontrarse fuera de las bandas de confianza.

#### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE y)

En la siguiente figura, se muestra el gráfico acumulativo tras realizar la prueba de bootstrapping de la cuarta componente de Fourier (pendiente).



**Gráfico 4. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente del ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.**

En caso de estudiar la pendiente de evolución de los datos, se puede determinar cómo casi en el 100% de las pruebas aleatorias ejecutadas, la tendencia no es tan elevada como en la prueba realizada originalmente, encontrándose este valor original fuera de los intervalos de confianza y confirmando del mismo modo que para la primera componente de Fourier, la existencia de cambio climático.

### 5.3.3 Conclusiones

Las conclusiones del estudio de los datos respectivos a la temperatura son certeras. Existe una tendencia ascendente en la temperatura máxima diaria en Valencia, resultado coincidente con los informes generados por el IPCC.

La temperatura es la variable climática más ampliamente estudiada y las previsiones globales son inequívocas, con un alto grado de confianza en que van a seguir aumentando en el corto y medio plazo como lo han estado aumentando durante las últimas décadas, del mismo modo en que se muestra en los resultados obtenidos tras la completa aplicación de la metodología de tratamiento de los datos.

Es por ello, que se confirma la validez de la metodología empleada para la temperatura.

A continuación, se estudia la evolución del transporte sólido litoral, variable trascendente en el estudio de la evolución litoral.

## 5.4 Aplicación a transporte sólido litoral

### 5.4.1 Introducción a la dinámica litoral

Previo a la aplicación de la metodología de estudio de los datos al transporte sólido litoral, resulta esencial conocer las principales características de la dinámica litoral.

La dinámica litoral es el resultado de la interacción, en la zona litoral, de viento, oleaje, corrientes, mareas, sedimentos y otros fenómenos (SPM, 1984), pudiendo dar lugar a la modificación de la costa con el paso del tiempo. En este apartado, se plantea una introducción a los conceptos básicos del transporte de sedimentos que se produce en la zona litoral.

La costa está sometida al constante impacto del oleaje, este flujo de energía genera campos de corrientes que predominantemente son longitudinales a la costa, es decir, paralelas. Dichas corrientes son susceptibles de poner en movimiento el sedimento existente en la costa una vez alcanza el umbral de movimiento. Además, a esta acción de las corrientes hay que sumarle la puesta en suspensión del material como consecuencia de la rotura del oleaje.

El oleaje es la causa fundamental del fenómeno del transporte de sedimentos, tanto la altura de ola, ángulo de incidencia como sus respectivos períodos influyen en movimiento del material. El ángulo de incidencia del oleaje con respecto a la costa consta de especial importancia, puesto que permitirá determinar la dirección que seguirá el transporte longitudinal.

Por tanto, es esencial disponer del conocimiento del oleaje para un adecuado entendimiento de la dinámica litoral en cualquier área.

El movimiento de sedimentos puede ser discontinuo a lo largo de la costa ya que, además del clima marítimo, influyen otros factores como lo son los accidentes geográficos o la construcción de barreras artificiales, las cuales pueden obstaculizar el transporte. Por tanto, existirán lugares donde se pierda material y otros donde quede retenido. Estas barreras pueden clasificarse según el grado de interrupción que provocan, a saber: parciales, si dejan pasar parte de los sedimentos; totales, si el paso es nulo, como, por ejemplo, el Puerto de Valencia.

Se define como unidad morfodinámica el tramo de costa en el que el transporte sólido litoral longitudinal es continuo, es decir, el espacio comprendido entre dos barreras totales. Además, si el tramo no es completamente independiente, pero existe algún elemento que causa un comportamiento distinto aguas arriba y aguas abajo del mismo, también se considerarán unidades morfodinámicas diferentes. El presente trabajo se centra en la unidad morfodinámica de Cullera.

## **CONCEPTOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

Existen dos tipos de transporte de sedimentos: el transporte longitudinal, paralelo a la línea de costa, y el transporte transversal, cuya dirección es perpendicular a la misma.

El primero puede cambiar de sentido en función de la dirección del oleaje; el segundo simplemente oscila entre la costa y el mar. En general, ambos son significativos en zonas próximas a la orilla, pero solo el transversal adquiere importancia en aguas más profundas (SPM, 1984).

En función de la zona de transporte, los sedimentos pueden moverse por arrastre o en suspensión. En el primer caso, los sedimentos se movilizan arrastrándose sobre el fondo marino; en el segundo caso, se levantan y se transportan suspendidos en el agua. Se puede

distinguir una tercera forma de transporte, denominada transporte laminar, que corresponde a una situación intermedia entre las dos anteriores.

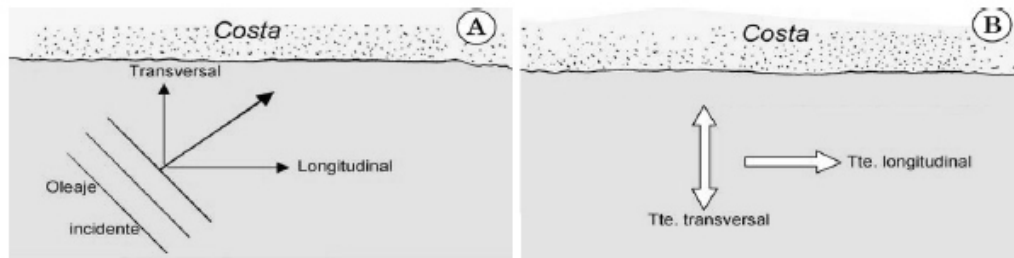


Figura 22. Esquema de descomposición del oleaje y del transporte de sedimentos generado. Fuente: De la Peña (2007).

### TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS

El transporte longitudinal de sedimentos es fluctuante a lo largo del tiempo y su sentido, también variable, depende de la dirección del oleaje.

$$Q_{l,neto} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} Q_l(t) dt$$

$$Q_{l,bruto} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} |Q_l(t)| dt$$

Esta variación de transporte puede ser medida y cuantificada por el transporte bruto y el transporte neto longitudinal que se produce en la zona. El transporte bruto expresa la cantidad total de material movilizado a lo largo de la costa independientemente del sentido. Por otro lado, el transporte neto corresponde a la diferencia de volumen de material transportado en un sentido y en otro, es decir, al balance de este, indicando su dirección final en el período estudiado.

Respecto al criterio de signos adoptado en el presente trabajo, se asocia un transporte neto positivo al movimiento que se produce de norte a sur y negativo cuando es de sur a norte.

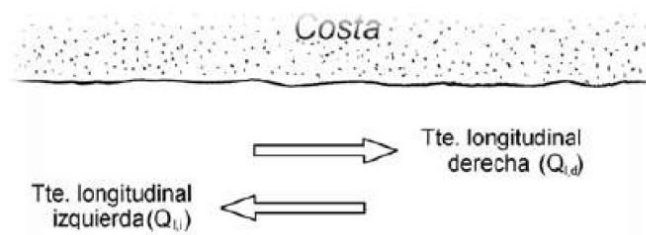


Figura 23. Tipos de transporte longitudinal de sedimentos. Fuente: De la Peña (2007).

Como se ha descrito previamente, el transporte de sedimentos predominante en el litoral valenciano es el Norte-Sur, las principales razones son las direcciones de oleaje predominantes en el Mediterráneo, así como el mayor fetch asociado como se observa en la siguiente figura:



Figura 24. Direcciones predominantes de oleaje y fetch asociado. Fuente: Google Earth (2022).

El cálculo del transporte longitudinal puede realizarse mediante cuatro procedimientos, cuyo uso dependerá de la información que se posea:

- Campaña de toma de datos.
- Evidencias morfológicas de la costa.
- Evolución de la línea de costa.
- Cálculo teórico.

En el presente trabajo se ha realizado el cálculo del transporte sólido longitudinal de manera teórica.



## FORMULACIÓN PARA EL CÁLCULO TEÓRICO DEL TRANSPORTE SÓLIDO LITORAL

Uno de los métodos más utilizados para el cálculo teórico del transporte longitudinal es el “Método del flujo de energía” del CERC (Coastal Engineering Research Center), desarrollado en el SPM (Shore Protection Manual (1984)). Las principales hipótesis del método son la consideración de una batimetría recta y paralela y una pendiente de playa uniforme, así como el estudio de un tramo de costa suficientemente largo.

Parte del supuesto de que la tasa de transporte de sedimentos es proporcional a la componente paralela a la costa del flujo de energía de la ola en la zona de rompientes.

El flujo de energía por unidad de cresta de la ola se define como:

$$P_l = (E * c_g)_b = \frac{pgH_b^2}{8} * C_{gb} \quad (3)$$

Siendo:

$(E * c_g)_b$  Flujo de la energía del oleaje evaluado en la zona de rotura

$E_b$  Energía evaluada en la línea de rotura

$C_{gb}$  Celeridad de grupo en la línea de rotura

$H_b$  Altura de ola en rotura

Al formar el oleaje un ángulo,  $\alpha$ , con la línea de costa, la componente longitudinal del flujo de energía por unidad longitudinal de playa,  $P_l$ , es:

$$P_l = P * \cos \alpha_b * \sin \alpha_b = \frac{pgH_b^2}{8} * C_{gb} * \cos \alpha_b * \sin \alpha_b \quad (4)$$

En Teoría Lineal puede asumirse que para pequeñas profundidades  $C_g \approx C$ . Además, puesto que  $\cos \alpha * \sin \alpha = \frac{1}{2} * \sin 2 \alpha$ , la ecuación queda:

$$P_l = \frac{pgH_b^2}{16} * C_g * \sin 2 \alpha_b \quad (5)$$

$\alpha_b$  Ángulo de rotura del oleaje respecto a la línea de costa

En general, la caracterización del oleaje emplea alturas de ola significativa. Para realizar una transformación de la fórmula que permita utilizar los datos disponibles en aguas profundas, se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

1. La velocidad de grupo equivale a la velocidad de la ola al romperse y puede aproximarse como (Galvin, 1967):

$$C_g \cong C = \sqrt{2gH_b} \quad (6)$$

2. La altura de ola en rotura,  $H_b$ , se relaciona con la altura de ola en aguas profundas,  $H_0$ , mediante coeficientes de refracción y asomeramiento evaluados en el punto de rotura:

$$H_b = k_s * k_r * H_0 \quad (7)$$

Donde:

$K_s$  Coeficiente de asomeramiento. Se considera constante:  $k_s^{\frac{1}{2}} = 1,14$

$K_r$  Coeficiente de refracción. Viene dado por la teoría de pequeñas amplitudes.

$$k_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_b}}$$

Se considera  $(\cos \alpha_b)^{\frac{1}{4}} = 1$

La ecuación de la altura de ola en rotura puede reescribirse como:

$$H_b^{\frac{1}{2}} = 1,14 * (\cos \alpha_b)^{\frac{1}{4}} * H_0^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Así pues, la fórmula de la componente longitudinal del flujo de energía en aguas profundas es:

$$P_l = 0,05 * \rho * g^{\frac{3}{2}} * H_{S0}^{\frac{5}{2}} * (\cos \alpha_0)^{\frac{1}{4}} * \sin 2 \alpha_0 \quad (9)$$

El cálculo del volumen de sedimentos transportado se basa en la tasa potencial de transporte de peso sumergido,  $I_l$ , y la tasa potencial de transporte volumétrica,  $Q_l$ , siendo esta última la utilizada en el campo de la ingeniería.

La expresión de la tasa de transporte potencial de sedimento sumergido es la siguiente:

$$I_l = (\rho_s - \rho) * g * (1 - n) * Q_l \quad (10)$$

Donde:

$\rho_s$  Densidad del sedimento

$\rho$  Densidad del agua del mar

$g$  Aceleración gravitacional

$n$  Porosidad del sedimento

$(1 - n) * Q_l$  Volumen sólido de transporte

Se vincula la tasa de transporte sumergido,  $I_l$ , con el flujo de energía por unidad longitudinal de playa,  $P_l$ , a través de la expresión:

$$I_l = K * P_l \quad (11)$$

Siendo K un coeficiente de proporcionalidad adimensional.

Para la determinación del parámetro K, el Shore Protection Manual (1984) supone un oleaje regular en rotura y propone el siguiente coeficiente para la altura de ola media cuadrática,  $H_{b,rms}$ .

$$K_{SMP,s} = 0,92$$

Convirtiéndola a altura de ola significativa, se tiene:

$$K_{SMP,s} = 0,92 * \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^{\frac{5}{2}} = 0,39$$

Teniendo en cuenta la relación inicial entre  $I_l$  y  $Q_l$ , puede determinarse el transporte longitudinal de la siguiente manera:

$$Q_l = \frac{K}{(\rho_s - \rho) * g * (1 - n)} * P_l = \frac{K * 0,05 * \rho * g^{\frac{3}{2}} * H_{S0}^{\frac{5}{2}} * (\cos \alpha_0)^{\frac{1}{4}} * \sin 2\alpha_0}{(\rho_s - \rho) * g * (1 - n)} \quad (12)$$

Los valores supuestos son los siguientes:

K	$g(m/s^2)$	$\rho(kg/m^3)$	$\rho_s(kg/m^3)$	n
0.39	9.81	1025	2650	0.4

Tabla 2. Parámetros de cálculo. Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que el ángulo  $\alpha_0$  hace referencia al que forma el frente de ola con la normal a la costa. Generalmente, en los datos de oleaje que se proporcionan, el ángulo considerado se refiere a una dirección fija que suele ser el norte. Por esta razón, se debe transformar el ángulo.

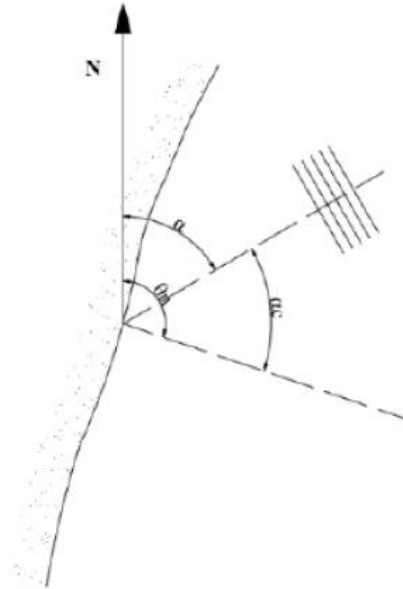


Figura 25. Relación de ángulos para el cálculo de transporte longitudinal. Fuente: De la Peña (2007).

- $\theta_n$             Ángulo que forman la normal a la costa y el norte
- $\alpha$             Ángulo que forma la ortogonal del frente de ola con el norte
- $\alpha_c$             Ángulo de cálculo del transporte longitudinal

El transporte longitudinal de sedimentos se realiza calculando  $Q_l$  para cada altura de ola  $H_S$  y para cada dirección representativa del tramo de estudio, teniendo en cuenta su probabilidad de presentación.

Así pues, la ecuación queda:

$$Q_l = \sum \left( 2,027 * 10^6 * H_0^{\frac{5}{2}} * (\cos \alpha_0)^{\frac{1}{4}} * \sin 2\alpha_0 * K_p * K_g \right) \quad (13)$$

Siendo:

- $H_0$             Altura de ola significativa en profundidades indefinidas
- $\alpha_0$             Dirección del oleaje en profundidades indefinidas respecto a la normal de la costa

$K_p$  Probabilidad, en tanto por uno, de presentación de una altura de ola en una determinada dirección

$K_g$  Coeficiente geométrico

En el presente trabajo, al disponer de datos horarios y tan solo trabajar con las direcciones del oleaje que afectan a la línea de costa objeto de estudio, los coeficientes de probabilidad y geométrico se consideran 1, por lo que no influyen en el cálculo de la capacidad de transporte sólido litoral.

#### 5.4.2 Estudio de los datos

Para el estudio de los datos del oleaje, a partir de los cuales se obtiene la capacidad de transporte sólido litoral, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones respecto al tratamiento de estos.

Como se ha expuesto en apartados anteriores, la acción dinámica del oleaje provoca el transporte de sedimentos, a partir del cual se pueden producir tanto retrocesos como avances de la línea de costa. Para que se produzca el transporte de sedimentos, la dirección del oleaje debe proceder de la masa marina, y por ello en el estudio de los datos, se elimina el rango de direcciones de oleaje procedente de tierra.

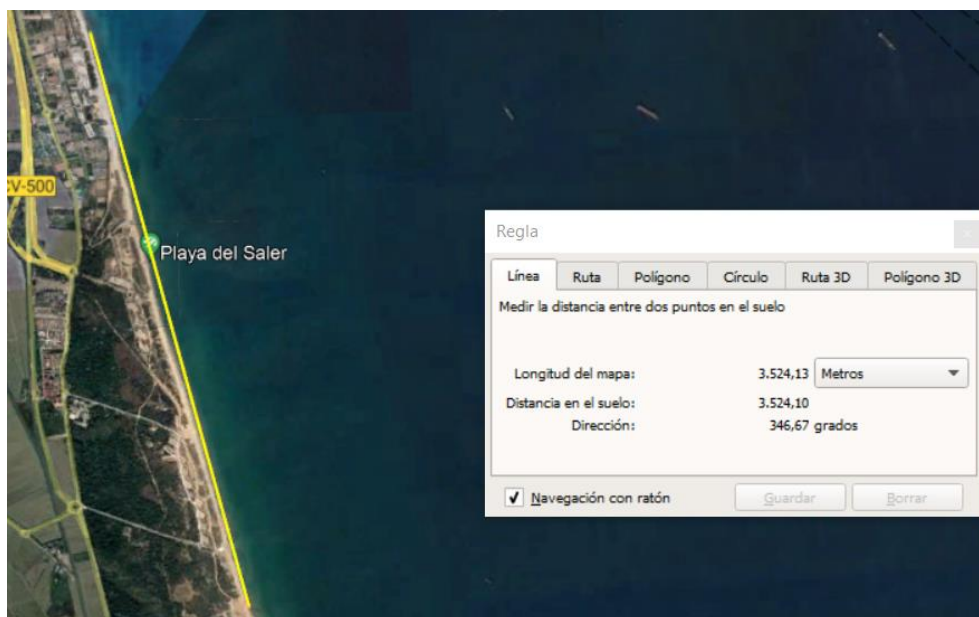


Figura 26. Dirección de la línea de costa de la Playa del Saler (Valencia). Fuente: Google Earth (2022).

La playa del Saler tomada como centro de estudio del tramo comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Culera tiene una dirección de la línea de costa de  $346,7^\circ$  aproximadamente. Es por ello por lo que los oleajes cuya dirección esté comprendida entre  $166,7^\circ - 346,7^\circ$  no se considerarán para el estudio de la dinámica litoral, ya que la dirección de procedencia es terrestre donde no se produce dinámica litoral.

Se estudia la evolución del transporte de sedimentos tanto en dirección Norte-Sur como Sur-Norte, respecto a la perpendicular a la línea de costa, es por ello por lo que los oleajes con dirección comprendida entre  $346,7^\circ - 76,7^\circ$  se consideran Norte-Sur y los oleajes con dirección comprendida entre  $76,7^\circ - 166,7^\circ$  se consideran Sur-Norte.



**Figura 27. Direcciones de transporte sólido litoral respecto a la línea de costa de la Playa del Saler. Fuente: elaboración propia en AutoCad (2022).**

Se dispone de una batería de datos horarios del oleaje, proporcionada por el organismo público Puertos del Estado, correspondiente al período de tiempo comprendido entre 1958-2021.

Los meses se identifican en forma angular ( $1 \text{ mes} = 30^\circ$ ), disponiéndose de un total de 756 meses.

Para el tratamiento de los datos del transporte de sedimentos, se aplica la distribución estadística de dos parámetros de Weibull, siendo esta la que mejor se ajusta al conjunto de los datos. Esta distribución se aplica sobre el conjunto de datos horarios agrupados mensualmente.

De la aplicación de la distribución Weibull se obtienen dos parámetros para cada mes: parámetro de escala ( $\eta = A$ ), parámetro de forma ( $\beta = B$ ). Del mismo modo que para el tratamiento de datos de la temperatura, los resultados se agrupan en una matriz de  $n$  columnas correspondientes al número de meses.

La función de distribución y los parámetros de la distribución Weibull dos parámetros se calculan según las siguientes ecuaciones, tratándose la primera de ellas, de la densidad de probabilidad, y la segunda de la función de distribución:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right], t \geq 0 \quad (14)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right], t \geq 0 \quad (15)$$

Donde:

$t$	Tiempo
$\beta (B)$	Parámetro de forma ( $\beta > 0$ )
$\eta (A)$	Parámetro de escala ( $\eta > 0$ )

El parámetro de forma ( $B$ ) describe la manera en que se distribuyen los datos, estimando asimetrías. En caso de valores altos del parámetro de forma, se indica una tendencia asimétrica a la izquierda: en caso contrario, una tendencia asimétrica a la derecha.

El parámetro de escala ( $A$ ) define la posición de la curva de Weibull respecto al valor umbral, el cual en el caso de la distribución de Weibull de dos parámetros es 0.

Por tanto, cuando tanto el valor del parámetro de escala como el de forma son mayores de uno, se trata de modelos crecientes.

Con el objetivo de poder linealizar los datos, de modo que el conjunto de datos de los bloques mensuales se normalice y, por tanto, poder aplicar distribuciones estadísticas, se eleva cada uno de los datos horarios a la raíz de  $5/2$  ( $\sqrt[2.5]{\text{Transporte sólido horario}}$ ).

En caso contrario, se dificulta el tratamiento estadístico del conjunto de datos.



Una vez estimados los parámetros de escala ( $A$ ) y forma ( $B$ ) resultado de aplicar la distribución estadística de Weibull, y analizada la tendencia de cada uno de los parámetros, con el objetivo de proporcionar mayor validez al análisis de la tendencia, se procede a calcular el valor medio ( $t$ ) de esta función de distribución.

Este valor medio de la función de distribución Weibull, representa el transporte sólido litoral horario medio linealizado para cada mes.

Para la obtención de datos de transporte sólido mensual, por tanto, resultaría necesario elevar el valor obtenido a 2,5 y multiplicar el mismo por 730, siendo este el número de horas que componen un mes.

Del mismo modo en que se obtienen tendencias crecientes para cada uno de los parámetros de Weibull, el valor medio de la distribución debe presentar resultados ascendentes.

El valor medio se obtiene según la siguiente ecuación, la cual también queda integrada en el código de programación realizado mediante el software MatLab:

$$\begin{aligned} \langle t \rangle &= \int_0^{\infty} t * f(t) * dt = \int_0^{\infty} t * \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] * dt = \\ &= \eta \int_0^{\infty} y^{1/k} e^{-y} dy = \eta \gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

Donde se ha hecho el cambio de variable  $y = \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}$ .

La función gamma  $\varphi(t)$  se define:

$$\gamma(t) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{t-1} dt$$

### 5.4.3 Resultados

El estudio de resultados sobre el transporte sólido litoral se centra en la evolución del valor medio ( $t$ ) de la distribución de Weibull, así como de cada uno de sus parámetros asociados ( $A$ ,  $B$ ).

## TRANSPORTE SÓLIDO NORTE-SUR

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para los parámetros (A, B) y posteriormente para el valor medio ( $t$ ) tras aplicar la metodología completa a cada una de estas variables según la dirección de transporte sólido litoral Norte-Sur.

### PARÁMETRO DE ESCALA (A)

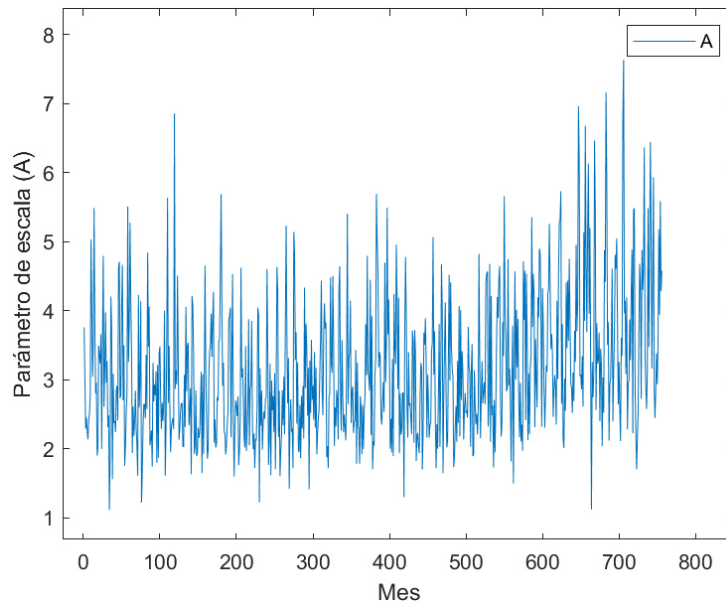


Gráfico 5. Evolución parámetro de escala (A) durante 756 meses. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Posteriormente, aplicamos el ajuste de Fourier.

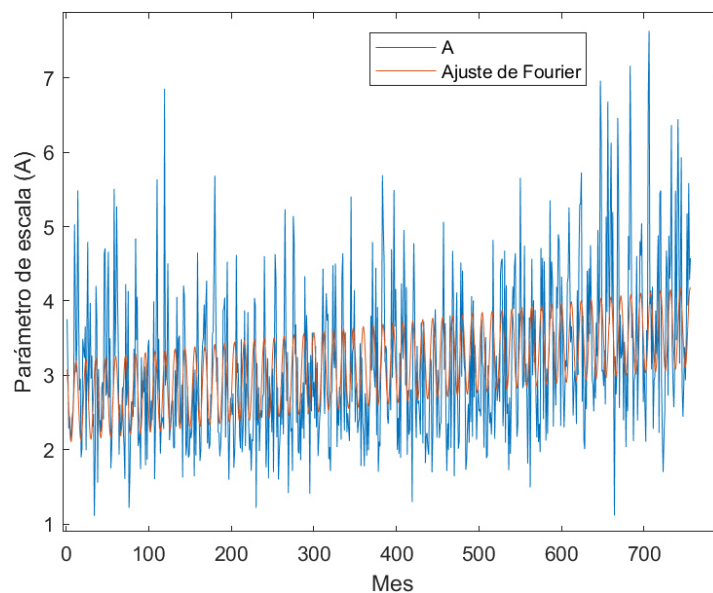


Gráfico 6. Evolución parámetro de escala (A) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Finalmente, se aplica la técnica de bootstrapping.

### 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA $C_0$ )

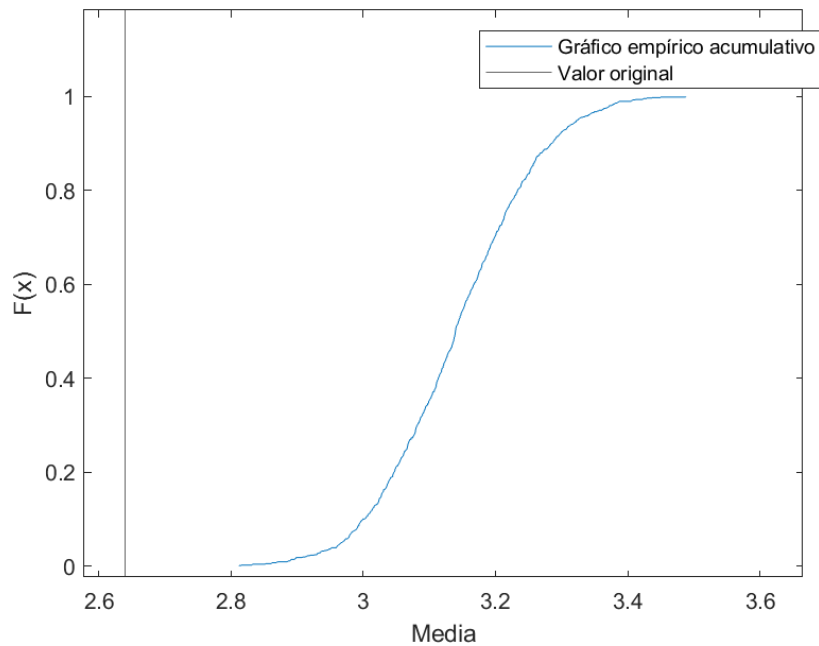


Gráfico 7. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE $y$ )

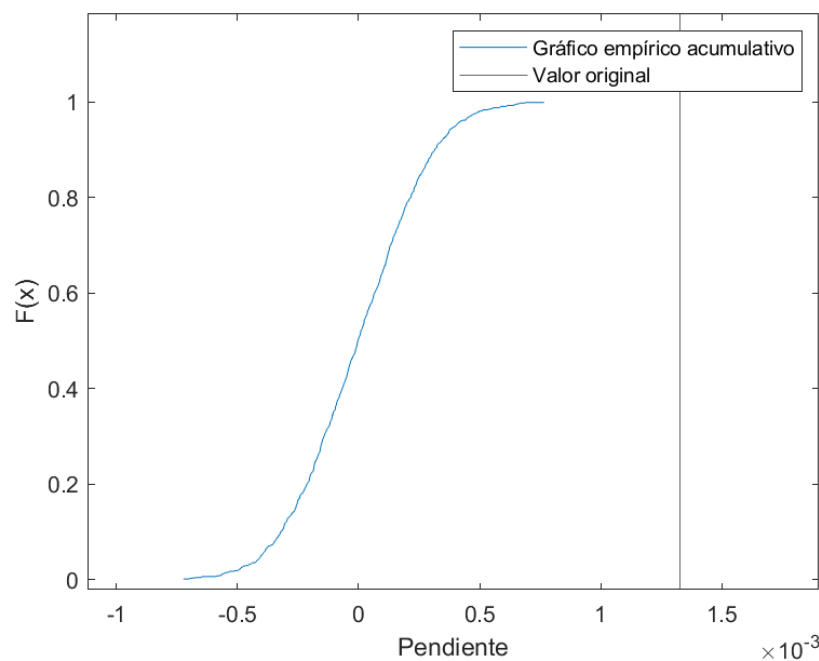


Gráfico 8. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

## PARÁMETRO DE FORMA (B)

Del mismo modo que para el parámetro de escala (A), se aplica la metodología para el parámetro de forma (B), mostrándose los resultados a continuación.

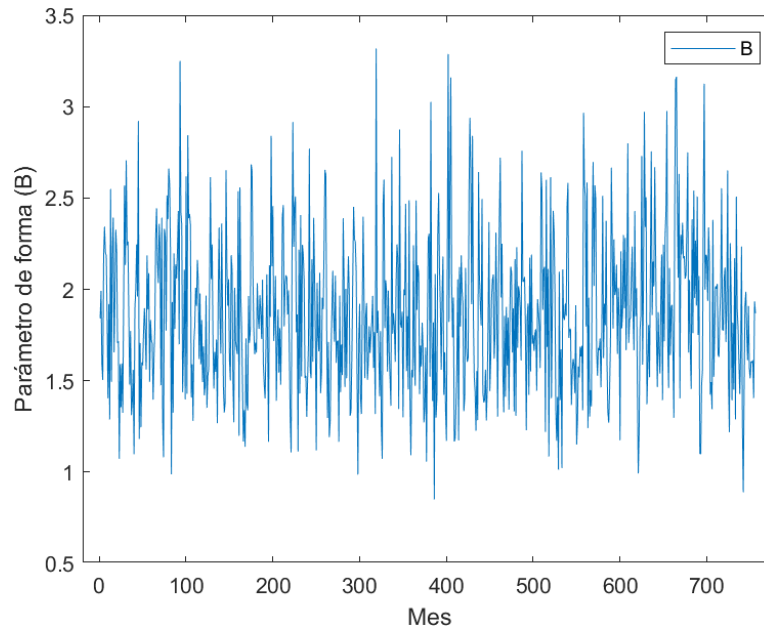


Gráfico 9. Evolución parámetro de forma (B) durante 756 meses. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Tras el análisis de Fourier:

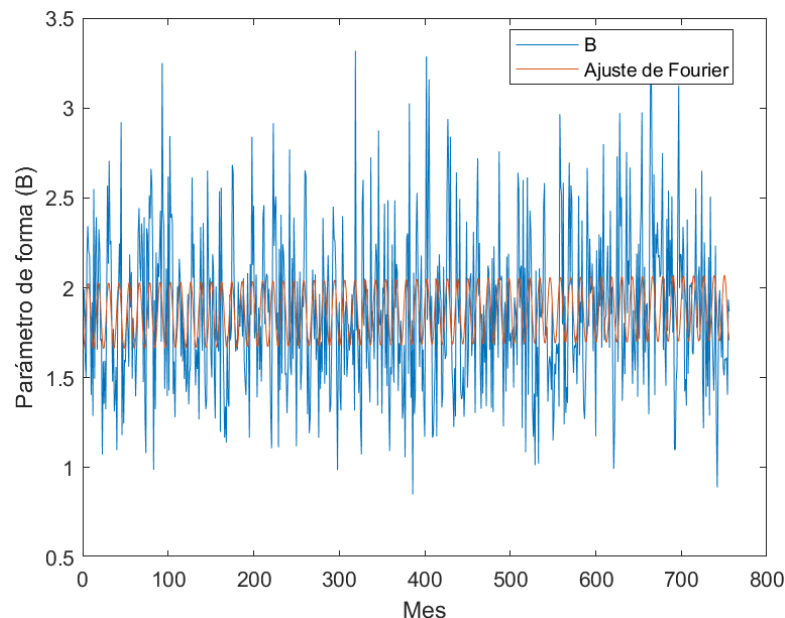


Gráfico 10. Evolución parámetro de forma (B) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Se aplica la técnica del bootstrapping.

### 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA C<sub>0</sub>)

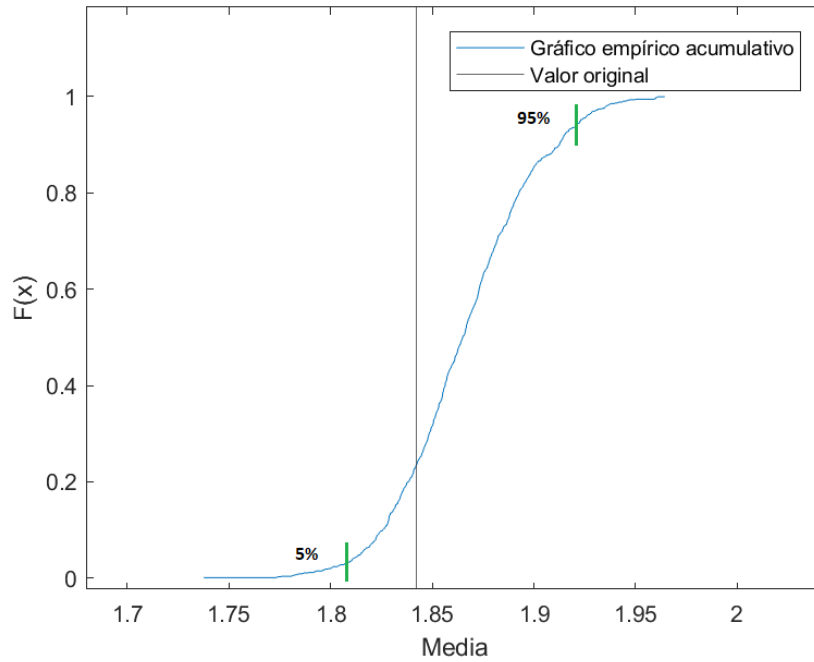


Gráfico 11. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE $y$ )

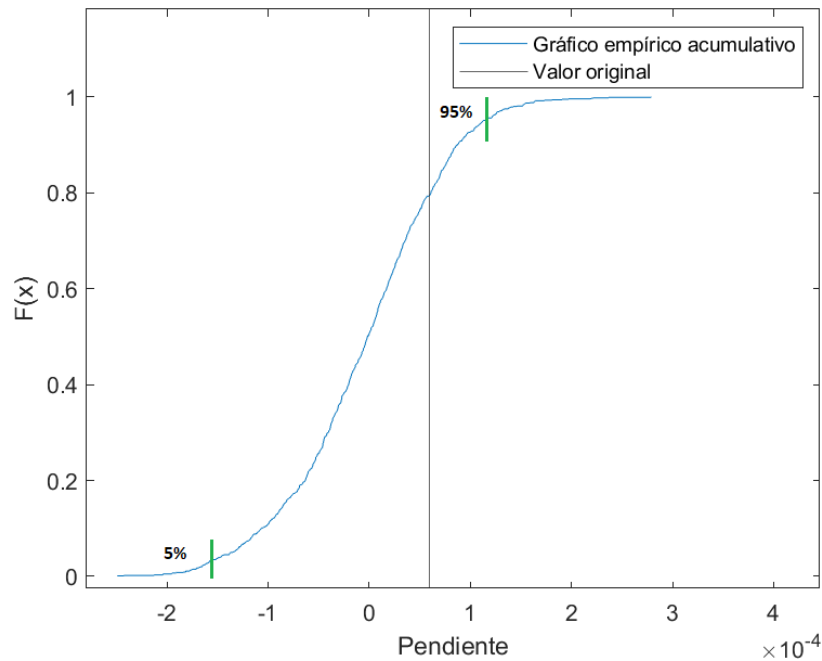


Gráfico 12. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

## VALOR MEDIO (t)

El resultado del valor medio se muestra a continuación

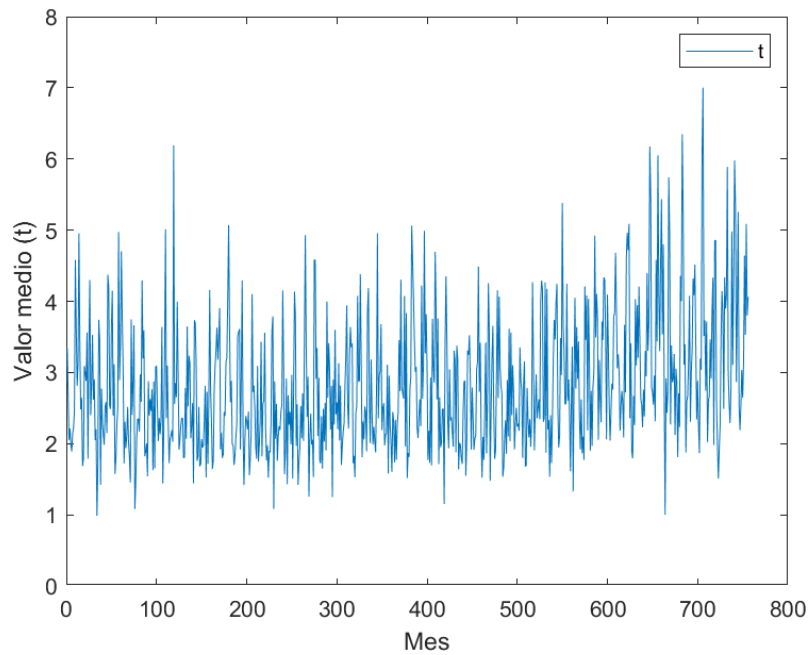


Gráfico 13. Evolución valor medio (t) distribución Weibull Norte-Sur durante 756 meses. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Tras el análisis de Fourier:

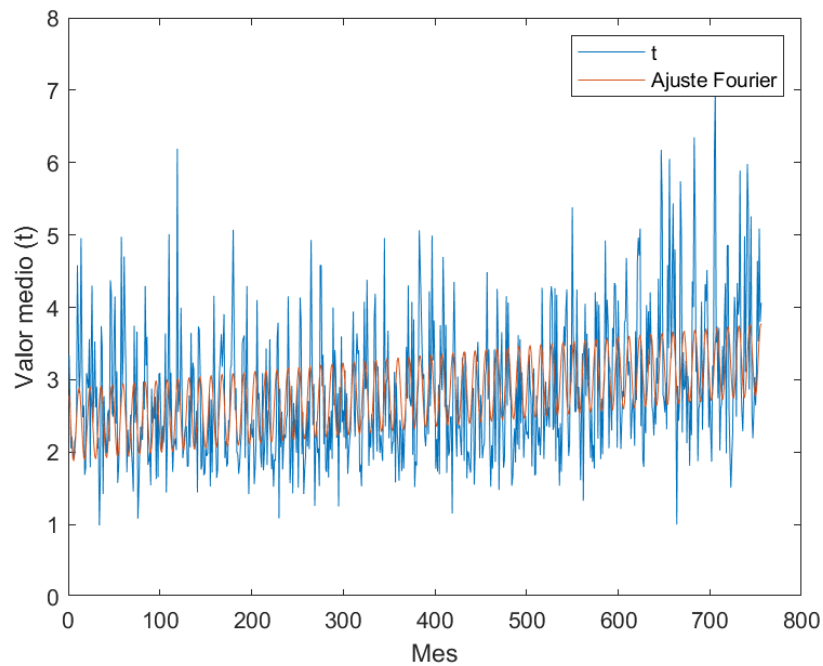


Gráfico 14. Evolución valor medio (t) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

A continuación, se aplica la técnica de bootstrapping, mostrando los resultados obtenidos.

### 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA $C_0$ )

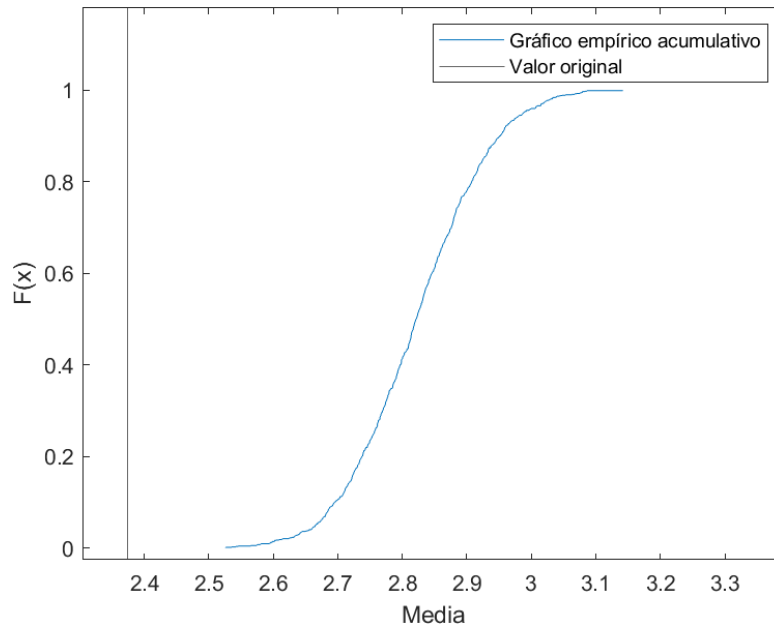


Gráfico 15. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE $y$ )

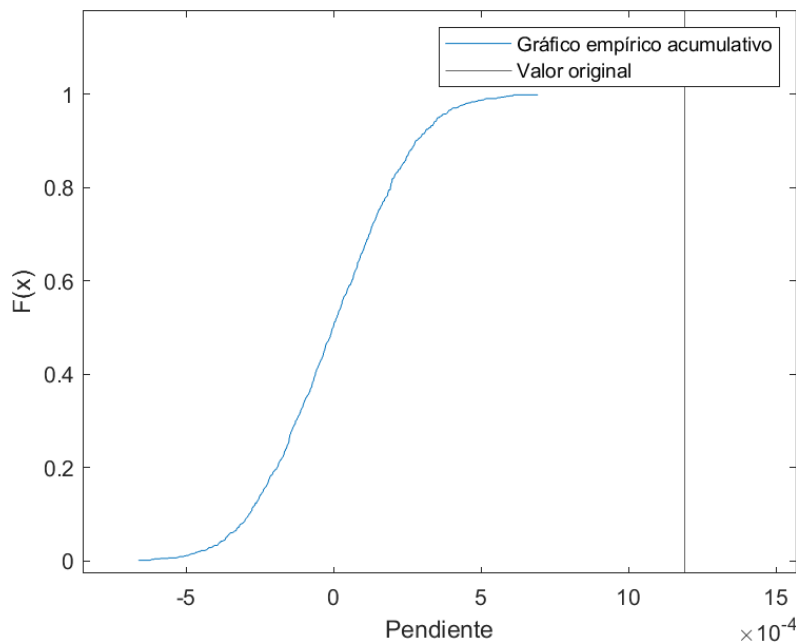


Gráfico 16. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.



## TRANSPORTE SÓLIDO SUR-NORTE

Del mismo modo que para el transporte Norte-Sur, se aplica la metodología para el transporte Sur-Norte.

### PARÁMETRO DE ESCALA (A)

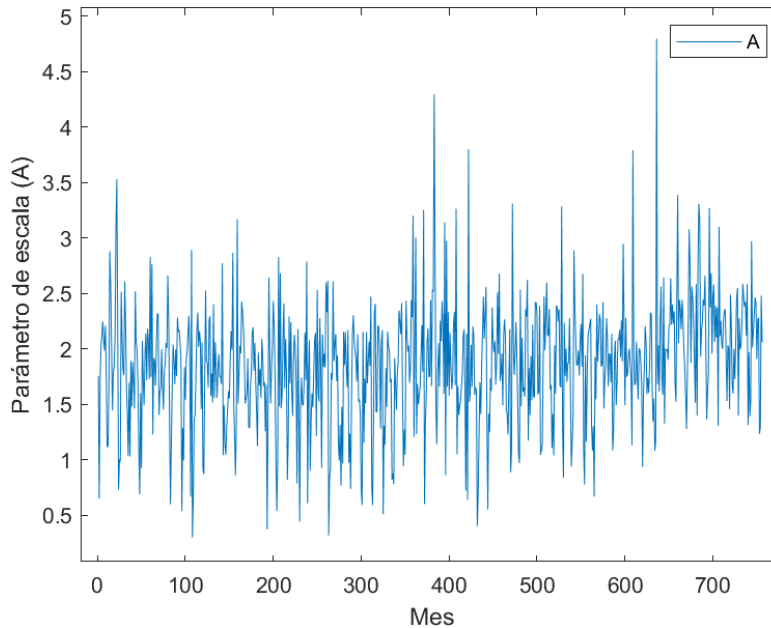


Gráfico 17. Evolución parámetro de escala (A) durante 756 meses. Fuente: elaboración propia en Matlab.

Tras el análisis de Fourier:

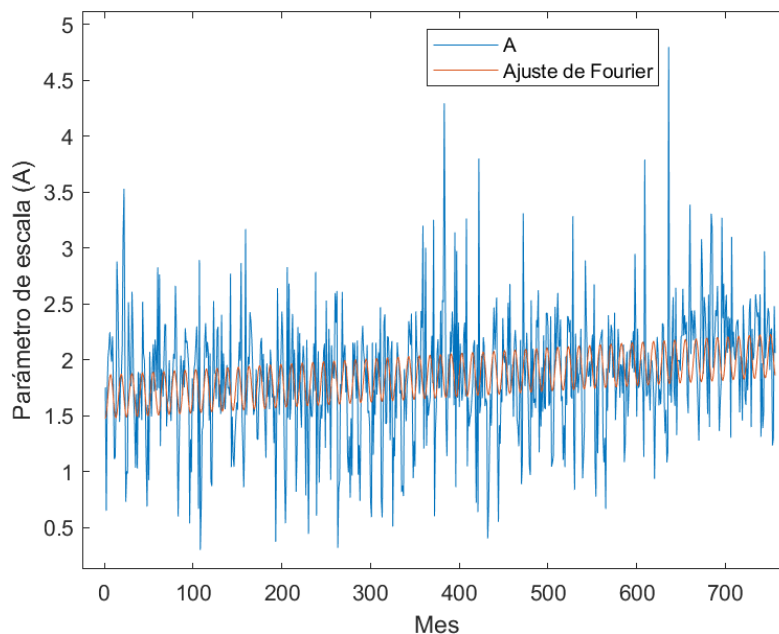


Gráfico 18. Evolución parámetro de escala (A) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA $C_0$ )

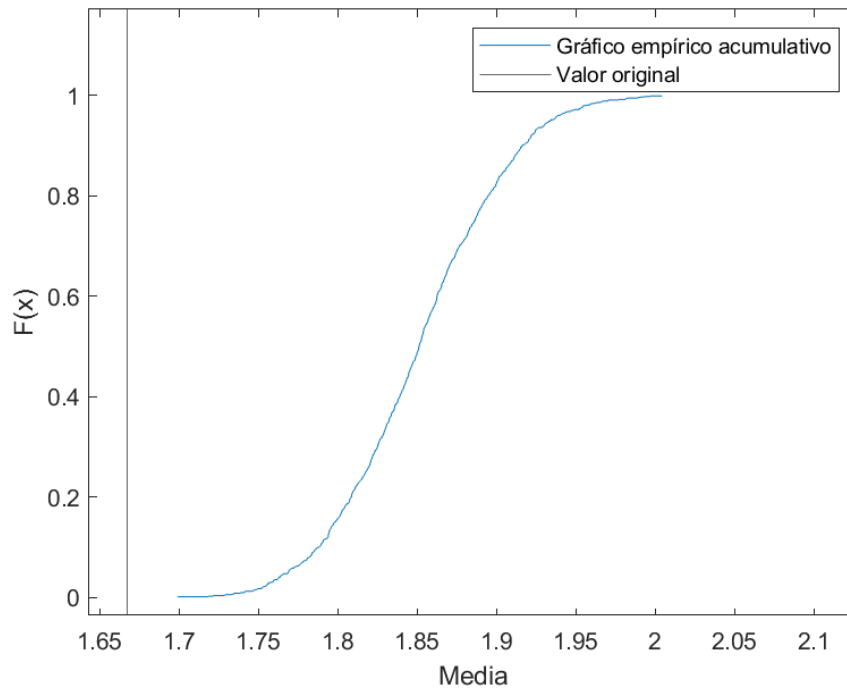


Gráfico 19. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE $y$ )

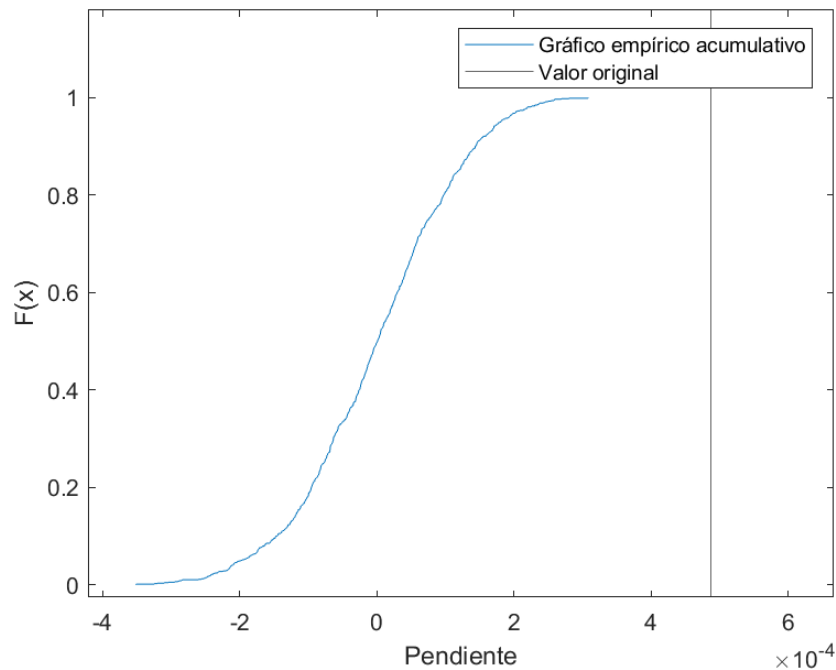


Gráfico 20. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

## PARÁMETRO DE FORMA (B)

Del mismo modo que previamente, se muestran los gráficos correspondientes al estudio de la evolución del parámetro de forma (B):

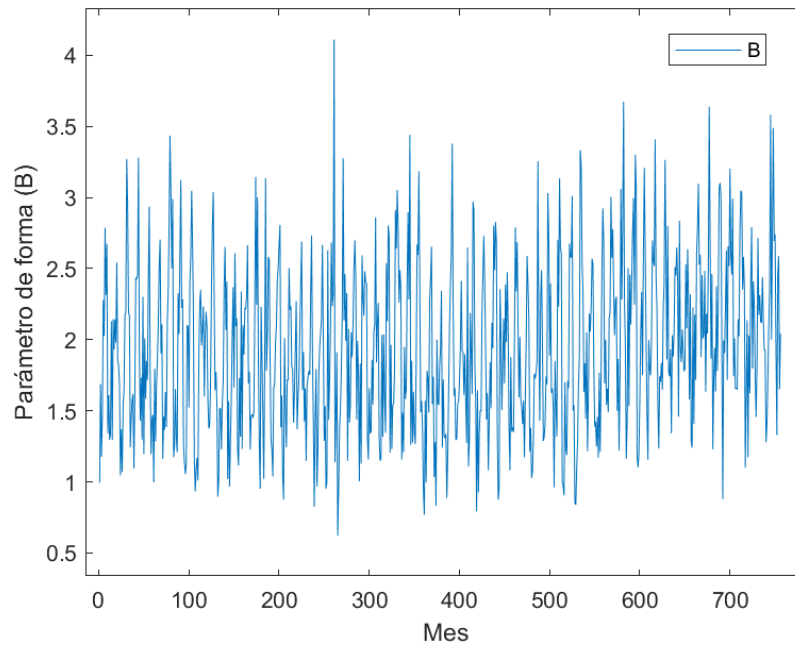


Gráfico 21. Evolución parámetro de forma (B) durante 756 meses. Fuente: elaboración propia en Matlab.

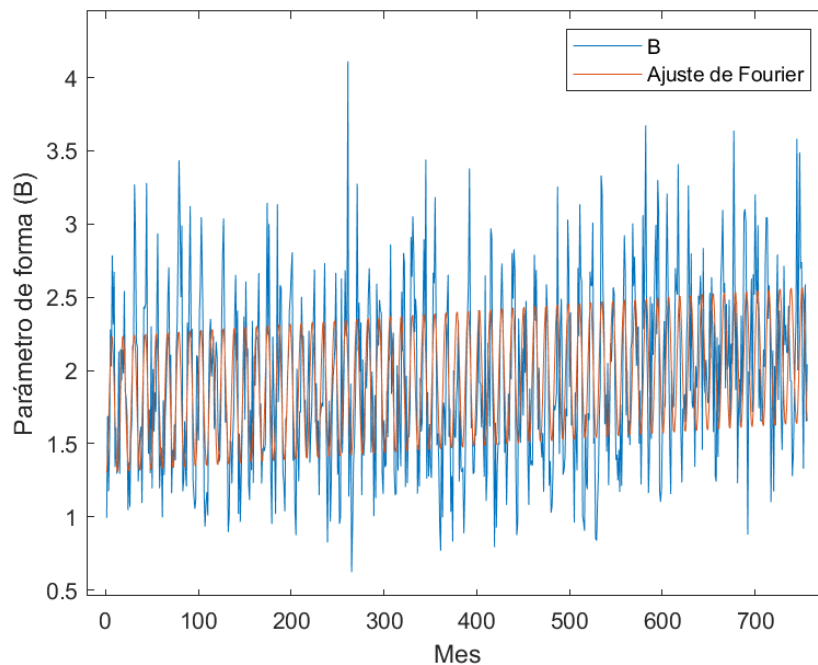


Gráfico 22. Evolución parámetro de forma (B) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA $C_0$ )

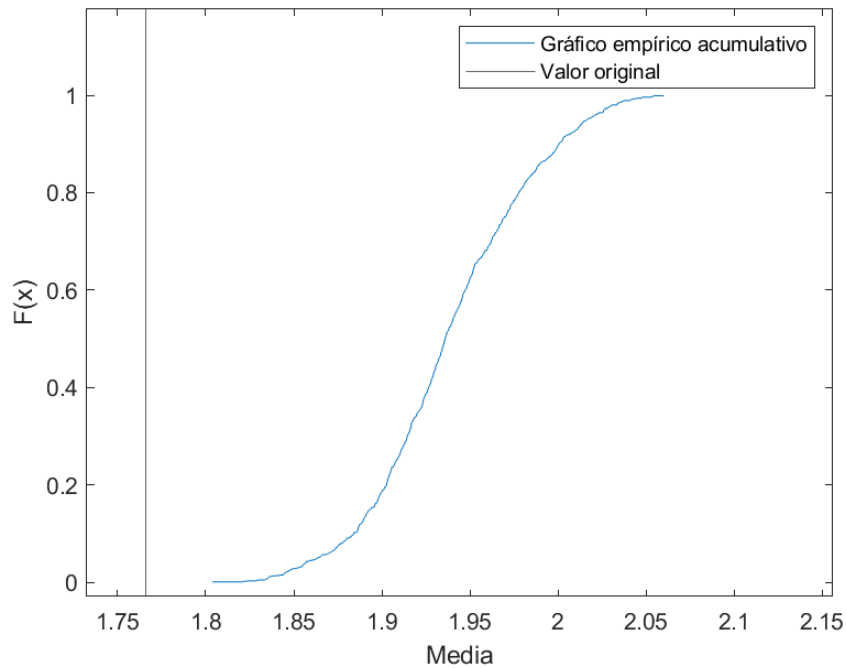


Gráfico 23. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE $y$ )

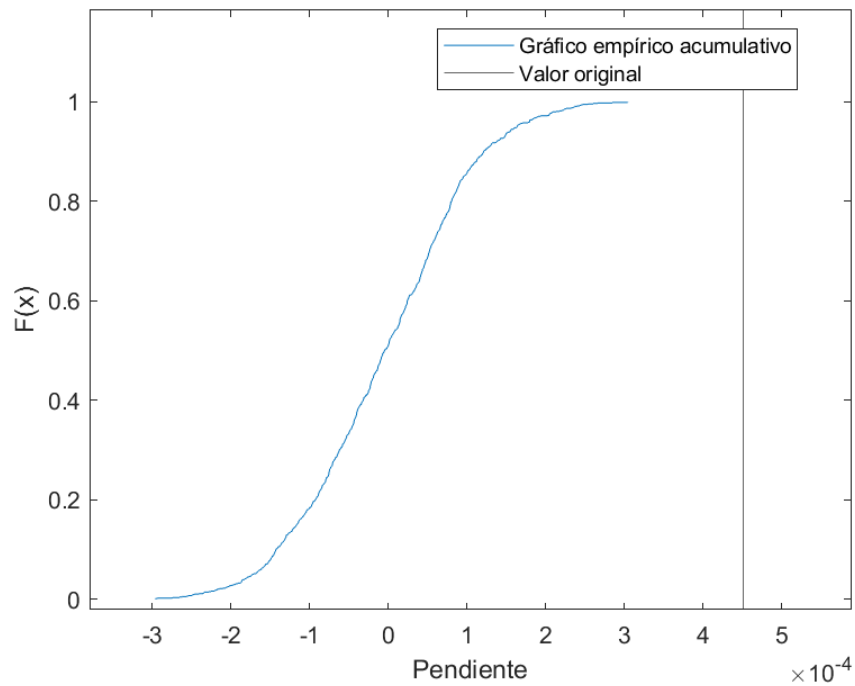


Gráfico 24. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### VALOR MEDIO (t)

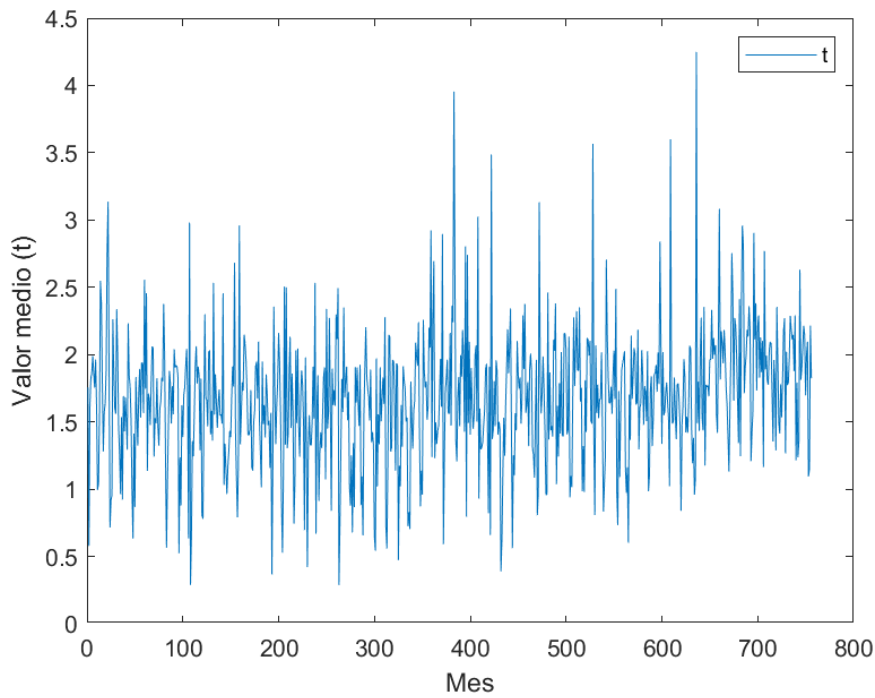


Gráfico 25. Evolución valor medio (t) distribución Weibull Sur-Norte durante 756 meses. Fuente: elaboración propia en Matlab.

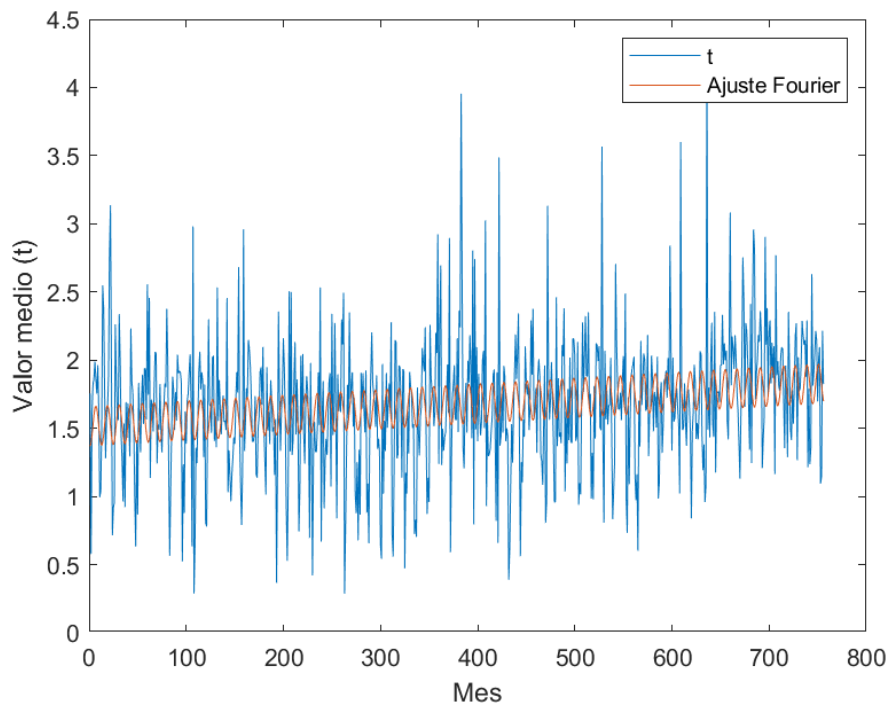


Gráfico 26. Evolución valor medio (t) durante los 756 meses aplicado el ajuste de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 1º COMPONENTE DE FOURIER (MEDIA $C_0$ )

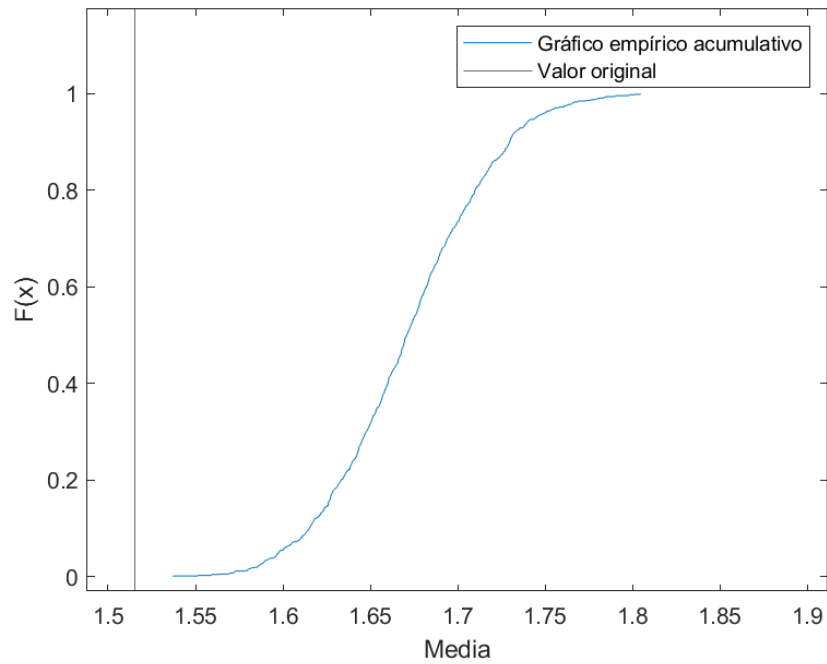


Gráfico 27. Gráfico empírico acumulativo de la primera componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

### 4º COMPONENTE DE FOURIER (PENDIENTE $y$ )

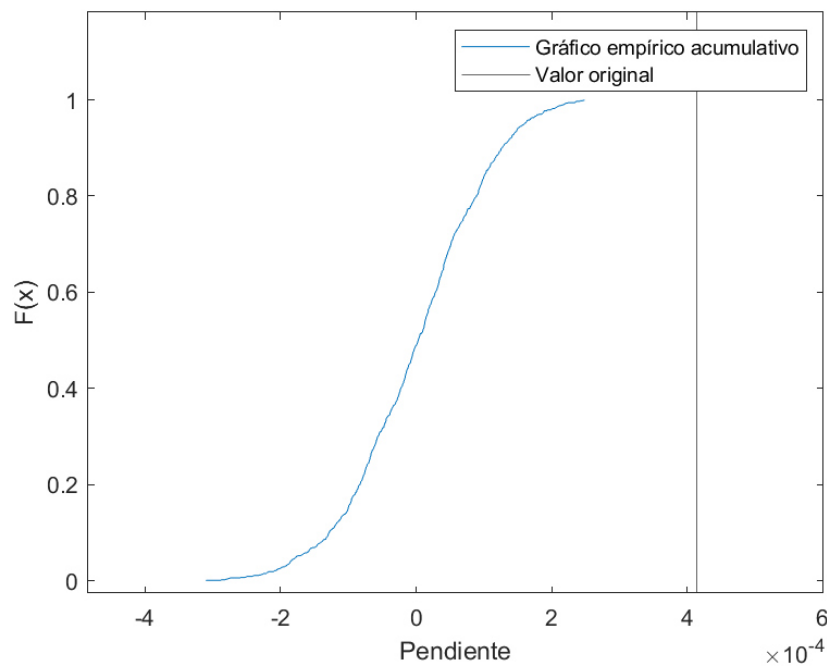


Gráfico 28. Gráfico empírico acumulativo de la cuarta componente de Fourier. Fuente: elaboración propia en Matlab.

#### 5.4.4 Conclusiones

Los resultados presentados tanto para la dirección Norte-Sur como Sur-Norte muestran tendencias crecientes del mismo modo que lo hacían con la evolución de la temperatura. Los efectos del cambio climático son evidentes.

La tendencia en la capacidad de transporte sólido litoral es ascendente tanto en dirección Norte-Sur como Sur-Norte para cada uno de los parámetros de Weibull (A, B).

El valor medio ( $t$ ) de la distribución Weibull proporciona del mismo modo una tendencia ascendente en la evolución de los datos, es decir, cada vez se produce un mayor arrastre de sedimentos.

La pendiente de evolución en el caso del valor medio según dirección Norte-Sur, es mayor que según dirección Sur-Norte, por lo que el transporte neto evidenciará también tendencias crecientes.

Mediante las pruebas de bootstrapping y sus gráficos empíricos acumulativos, se reafirma la hipótesis de existencia de cambio climático, reflejada en la tendencia en la evolución de los datos, al encontrarse la muestra original, casi en la totalidad de las gráficas fuera de las bandas de confianza.

La única excepción, se encuentra en el estudio de la evolución del parámetro de forma (B) según la dirección de transporte Norte-Sur, donde la tendencia no es claramente ascendente, y el resultado de la muestra original en las pruebas de bootstrapping se encuentra dentro del intervalo creado por las bandas de confianza, donde se acepta la hipótesis nula de no existencia de cambio climático.

Sin embargo, al disponer de una tendencia claramente ascendente tanto para el parámetro de escala (A) como para el valor medio de la distribución ( $t$ ), siendo esta la variable más relevante en la determinación de la tendencia, y la cual arroja resultados claramente ascendentes, con un 15% de aumento de este a lo largo de los 756 meses objeto de estudio, se confirma la tendencia en aumento en el transporte de sedimentos según la dirección Norte-Sur.

Por tanto, realizando remuestreos mediante la prueba de bootstrap, lo más probable es que los valores medios de los parámetros de Weibull sean mayores a los originales y que la pendiente sea ascendente pero no tan elevada como se muestra originalmente.



Presentados los resultados, se evidencia el aumento en la capacidad de transporte sólido litoral.

Hasta ahora para poder llevar a cabo el tratamiento estadístico de los datos, ha sido necesario linealizar el conjunto de estos, así como la aplicar la correspondiente distribución estadística, para poder emplear esta metodología propuesta.

En base a los resultados obtenidos, los cuales muestran una tendencia creciente en la evolución del transporte de sedimentos para el tramo considerado, se plantea una propuesta de aplicación, de modo que se prepare el tramo litoral objeto de estudio, para anticiparse a las consecuencias asociadas a este aumento.

Con el fin del desarrollo de una metodología alternativa en el estudio de la tendencia de los datos, y según las técnicas empleadas por otros autores plasmadas en el estado del arte del presente documento, durante la elaboración de la propuesta de aplicación, se desarrolla una segunda técnica de trabajo, la cual además de evidenciar y confirmar las tendencias en la evolución de los datos, permite realizar una estimación del volumen de sedimentos que se va a transportar en los próximos años.

## 6. Propuesta de aplicación: alimentación artificial de las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera

### 6.1 Introducción

Las evidencias mostradas sobre el aumento de la temperatura y del transporte sólido litoral son certeras, sin embargo, ¿cómo afecta este aumento en la capacidad de transporte sólido litoral al tramo de costa objeto de estudio situado al sur de una barrera total al transporte de sedimentos como es el Puerto de Valencia, comprendido entre el mismo y el Cabo de Cullera?

Mediante el análisis de la evolución parámetros de Weibull se han obtenido conclusiones certeras, sin embargo, estos datos, no son aptos a tomar como base para realizar una propuesta o proyecto de aplicación, ya que se debe disponer de datos sin linealizar y sin la aplicación de distribuciones estadísticas sobre el transporte sólido para el correcto cálculo del volumen de sedimentos que se han transportado durante las últimas décadas.

Fruto de ello, nace una segunda metodología de estudio en la cual, además de poder caracterizar la tendencia en la evolución de los datos del mismo modo que para la primera metodología, mediante el empleo de herramientas de cálculo alternativas, como la regresión lineal simple, permite la realización de pronósticos en las variables de estudio consideradas.

El objeto del presente trabajo es obtener la cantidad de sedimentos que se habrán transportado naturalmente a lo largo del tramo correspondiente entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera para el año 2040, de modo que, disponiendo de estos pronósticos, junto a las previsiones de subida de nivel del mar proporcionadas por los principales organismos climáticos como el IPCC, se pueda preparar la línea de costa del tramo objeto de estudio para anticiparse a los daños futuros esperados.

El tramo objeto de estudio, tras la construcción del Puerto de Valencia, ha sufrido desequilibrios en la dinámica del litoral, con la consecuente variación sobre la línea de costa en las últimas décadas, especialmente en las playas más cercanas a esta barrera total al transporte de sedimentos.

En caso de no actuar sobre este tramo, en las próximas décadas los daños provocados pueden ser severos con el consecuente coste económico, social y medioambiental.

Las previsiones de transporte de sedimentos, junto a las previsiones de subida del nivel del mar emitidas por el IPCC y el IH Cantabria, son suficientes para realizar una propuesta de aplicación sobre el tramo objeto de estudio, de modo que se anticipe a las futuras erosiones y daños sobre el tramo litoral, de modo que, en el año 2040, la costa se encuentre en la misma situación en que se encuentra actualmente, o mejor.

Los costes de anticipar son generalmente menores que los de reparar una vez dañado, por tanto, se trabaja en el desarrollo de una propuesta más eficiente respecto a las realizadas habitualmente sobre la costa española.

La propuesta de aplicación consiste en una actuación blanda sobre la costa, las cuales no alteran sustancialmente la dinámica litoral de la zona de actuación, permitiendo una continuidad de la dinámica litoral a través de ella (De la Peña, J.M., 2007).

Esta actuación pretende simular a la naturaleza mediante alimentación artificial de las playas afectadas mediante la creación de cadenas dunares a lo largo de los 7 primeros kilómetros más dañados del total de 26,6 kilómetros que componen el tramo objeto de estudio, sin embargo, para ello es necesario conocer los pronósticos de transporte de sedimentos, así como los conceptos fundamentales a considerar en el desarrollo de proyectos de regeneración de playas.

## 6.2 Conceptos previos de playas

Las playas son acumulaciones de sedimento, arena, gravilla, grava y bolos, a lo largo de la línea de orilla del mar, proveniente, principalmente, de los cauces fluviales que los aportan de forma más o menos regular, como ríos, o esporádicamente, como ramblas, barrancos y rieras, aunque ocasionalmente pueden tener otros orígenes (Ministerio de Medio Ambiente, 2008).

Las playas, tienen tres funciones básicas en el territorio:

1. Defensa de costa: como defensa de costa, se espera de la playa que, ante los embates del mar, se modele de tal forma que absorba la energía del oleaje sin llegar a alcanzar nunca los bienes existentes en su trasdós.

2. Hábitat para la flora y fauna silvestres: como hábitat para la flora y fauna, la playa en sus diferentes zonas, seca, húmeda y sumergida posee un importante valor ecológico que hay que preservar y, en su caso, recuperar.

3. Zona de esparcimiento y uso público social: como zona de esparcimiento y uso público, la playa debe formar un área para el disfrute y bienestar de la población, tanto en estaciones estivales y vacaciones como a diario, especialmente en zonas urbanas.



Figura 28. Funciones de la playa en el territorio. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2008).

Para el correcto entendimiento de las playas, es necesario conocer su zonificación:

- Zona activa o de inmersión: es la franja de arenas más próxima a la orilla que debe permanecer libre en casi toda su longitud, para favorecer la inmersión y tránsito de los bañistas.
- Zona de reposo o inactiva: es inmediata y paralela a la anterior en la que se permite la colocación de elementos portátiles que faciliten la permanencia a los usuarios.
- Zona de espacios libres o servicios: es el conjunto de terrenos inmediatos a la zona de reposo por el lado de tierra y limitado por el final de la playa.



Figura 29. Zonificación de las playas. Fuente: Yepes, V. (2002).

Del mismo modo, el perfil de una playa está compuesto por cuatro zonas:

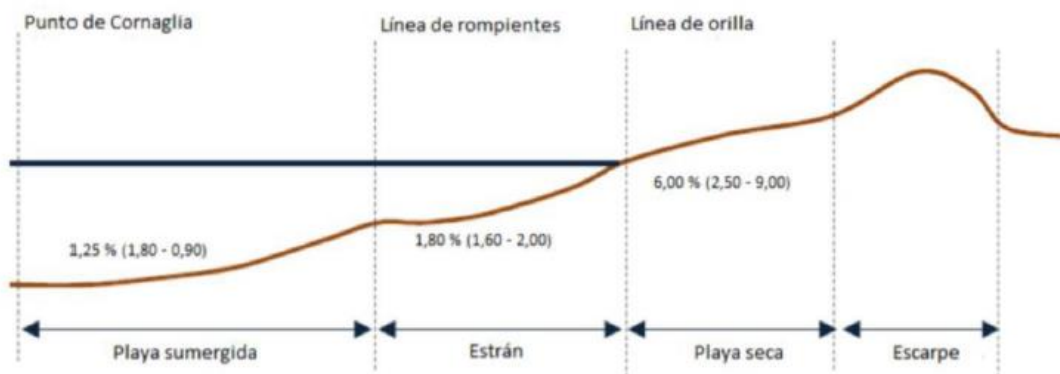


Figura 30. Perfil de una playa. Fuente: De Esteban, V. (2021)

Se presta especial atención al perfil de equilibrio de una playa, el cual se define como la morfología que alcanzará un perfil de playa expuesto a unas condiciones de oleaje constantes, fundamentalmente de altura de ola y período, y compuesto por un tamaño de grano determinado (Larson, 1991).

La tendencia general es que la pendiente de la playa es mayor en la línea de costa y disminuye conforme se avanza mar adentro. El modelo matemático más utilizado para definir este perfil de equilibrio es el Perfil de Dean (1991), que depende del grado de exposición de la playa y del tamaño de sedimento ( $D_{50}$ ).

Por otro lado, el perfil de la playa varía a lo largo del año, principalmente debido al clima marítimo. Es posible distinguir dos perfiles: de barra (invierno) y de berma (verano). El perfil de la playa no se corresponderá de forma exacta a estos perfiles, pero a lo largo del tiempo se adaptará y llegará al perfil de equilibrio.

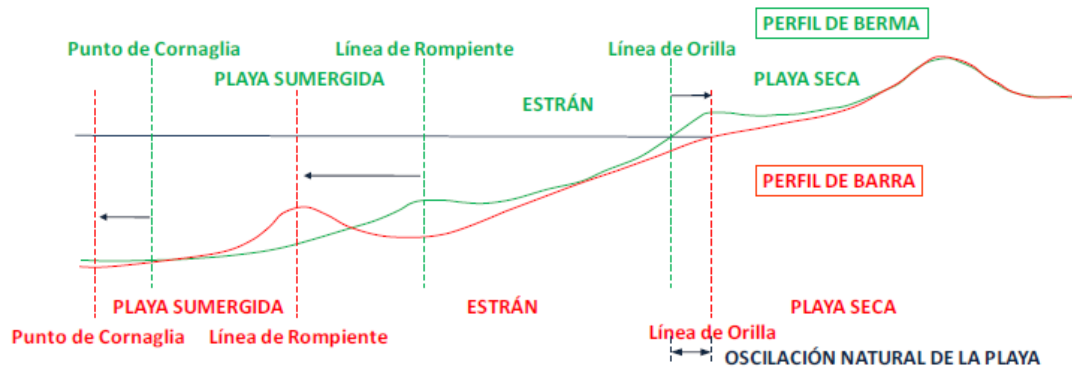


Figura 31. Perfiles de berma y de barra. Fuente: De Esteban, V. (2021)

Todos estos, son conceptos que se trabajan en la elaboración de propuestas de regeneración sobre la línea de costa de cualquier área geográfica.

### 6.3 Pronósticos de transporte sólido 2040

Del mismo modo que para el análisis de las tendencias en la evolución de los datos empleado en la primera metodología, las consideraciones particulares del tramo objeto de estudio tales como la dirección de la línea de costa, así como el rango de direcciones para el cual se produce transporte sólido litoral se mantienen.

#### 6.3.1 Metodología

En esta segunda metodología, enfocada en la aplicación práctica, se trabajará exclusivamente con los datos correspondientes al oleaje, los mismos empleados para el análisis de tendencias en la primera metodología de trabajo.

En primer lugar, se aplica la conversión angular y distribución por bloques mensuales al conjunto de los datos.



Posteriormente, se emplea la formulación desarrollada por el CERC para el cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos de manera horaria, sin embargo, no se aplicará ninguna distribución estadística al conjunto de datos.

En su lugar, mediante la suma de los valores correspondientes al transporte de sedimentos horario, se procede a calcular tanto el transporte de sedimentos mensual como anual.

Una vez se dispone de la capacidad de transporte sólido litoral de manera mensual y anual, se procede a aplicar la herramienta estadística conocida como regresión lineal simple.

Del mismo modo en que se aplica la herramienta de la regresión lineal simple, es posible aplicar el análisis de Fourier.

Mediante el empleo de ambas herramientas es posible determinar la evolución de los datos correspondientes al transporte sólido litoral y, por tanto, determinar la tendencia en los mismos. Sin embargo, para la realización de pronósticos y del mismo modo que otros autores han demostrado en el estado del arte, se decide emplear la regresión lineal simple.



Figura 32. Metodología de aplicación al transporte sólido litoral y elaboración de pronósticos. Fuente: elaboración propia.



La regresión lineal es una técnica paramétrica utilizada para predecir variables continuas dependientes, dado un conjunto de variables independientes, es decir, se utiliza para predecir el valor de una variable según el valor de otra (González, L. 2018).

La variable que se desea predecir se denomina variable dependiente, en este caso la capacidad de transporte sólido, y la variable que se está utilizando para predecir el valor de la otra se denomina variable independiente, en este caso el tiempo.

La regresión lineal se ajusta a una línea recta o a una superficie que minimiza las discrepancias entre los valores de salida previstos y reales.

Los modelos de regresión lineal son relativamente sencillos y proporcionan una fórmula matemática fácil de interpretar que puede generar predicciones.

Se trata de un procedimiento estadístico establecido hace mucho tiempo y se ha convertido en una forma comprobada de predecir el futuro de forma científica y confiable.

Es de naturaleza paramétrica porque hace ciertas suposiciones basadas en el conjunto de datos.

Para hacer una estimación del modelo de regresión lineal simple, se trata de buscar una recta de modo que se ajuste a la nube de puntos, de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (17)$$
$$\beta_0 = \bar{y} - b\bar{x}$$
$$\beta_1 = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2}$$

Del estudio de la evolución de los datos históricos hasta la fecha actual es posible obtener la recta que se ajusta a la nube de puntos, la cual se emplea para extrapolar los resultados a futuro y generar pronósticos de transporte de sedimentos.

Desde al año 1958 hasta el año 2021 han transcurrido 63 años o 756 meses, como se muestra en los gráficos de dispersión.

Para los pronósticos del año 2040, transcurrirán otros 19 años o 228 meses, dando como resultado un total de 82 años o 984 meses desde el año 1958.

Los resultados de la evolución de la tendencia y pronósticos se muestran tanto mensual como anualmente, de modo que se puedan tener conclusiones más certeras, así como realizar una comparación de pronósticos.

Además de los gráficos correspondientes a la evolución de la variable transporte sólido y mediante el empleo de esta misma herramienta, se ha caracterizado la evolución del número de horas en que el transporte se produce según la dirección estudiada, lo cual permitirá estimar además de la cantidad de sedimentos transportados, la evolución de la dirección de procedencia de estos, cuyo estudio puede resultar relevante en el futuro dimensionamiento de obras costeras.

### 6.3.2 Resultados

#### TRANSPORTE NORTE-SUR

Los resultados obtenidos para el transporte sólido litoral según la dirección Norte-Sur tanto mensual como anualmente son los siguientes:

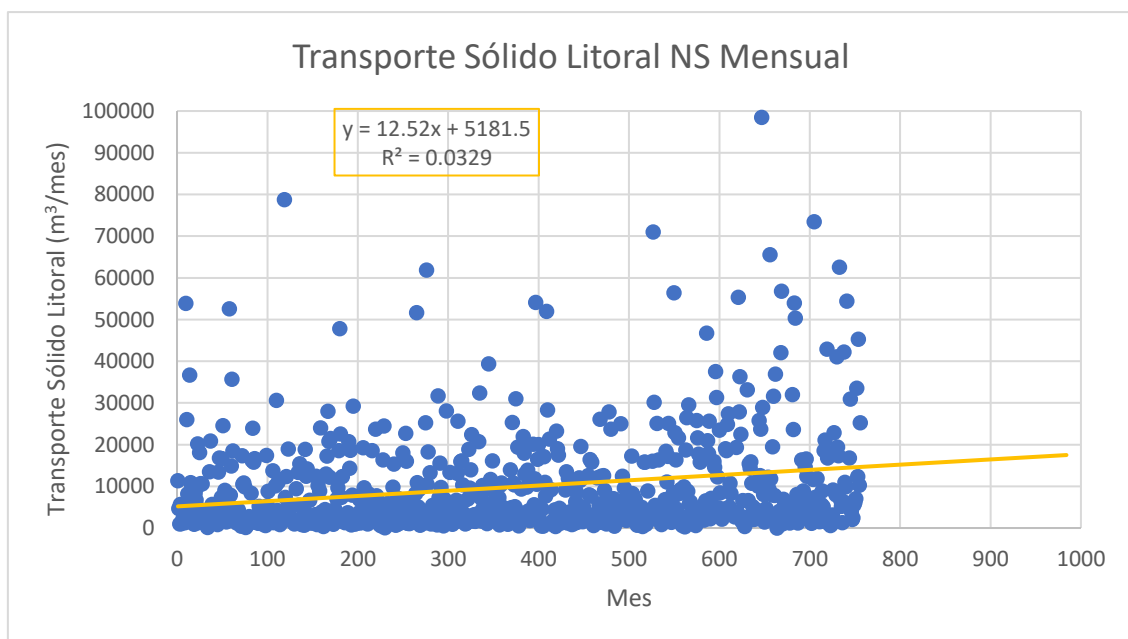


Gráfico 29. Resultados evolución transporte sólido litoral mensual dirección Norte-Sur. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

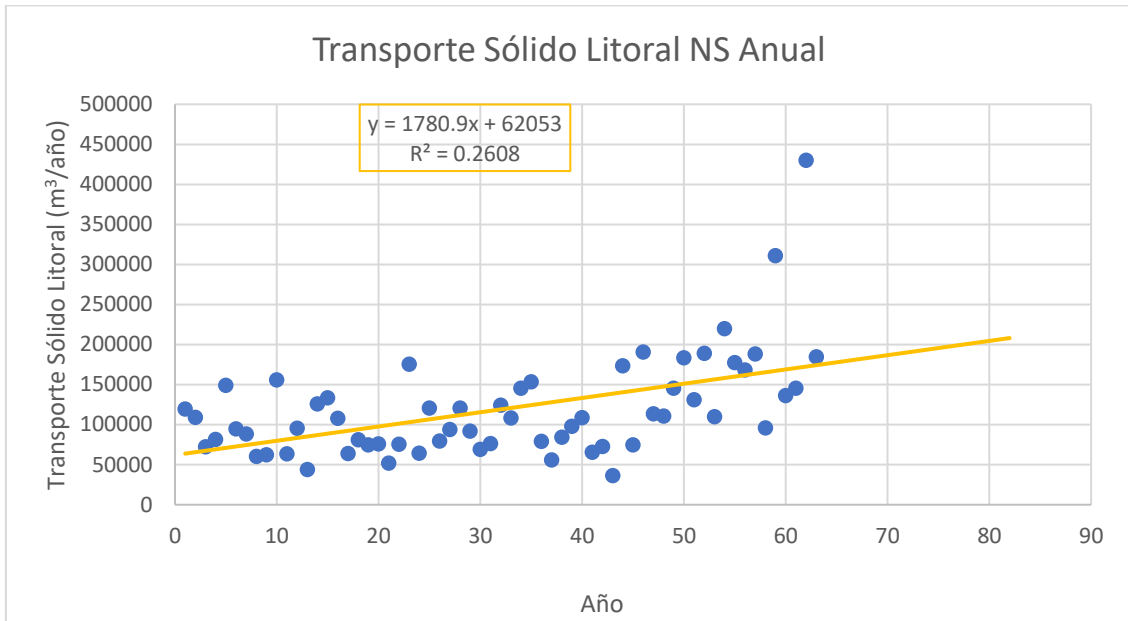


Gráfico 30. Resultados evolución transporte sólido litoral anual dirección Norte-Sur. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

Respecto al pronóstico del número de horas en que el transporte sólido litoral se producirá cada mes según la dirección Norte-Sur sobre un total de 730 horas que lo componen, es el siguiente:

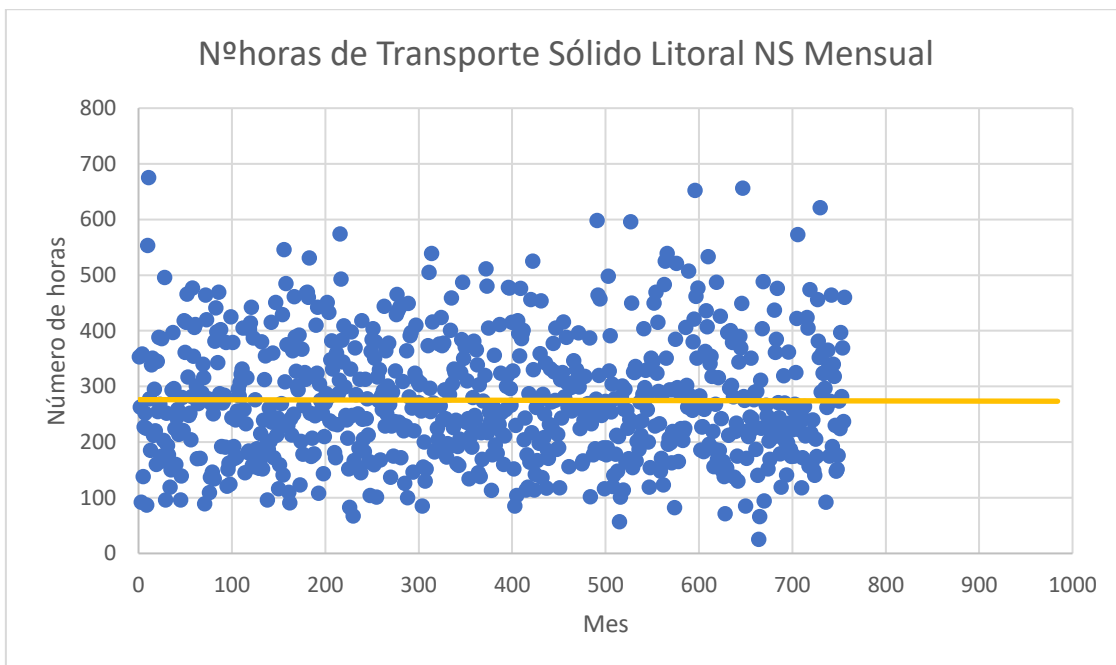


Gráfico 31. Resultados evolución número de horas en que se produce transporte sólido litoral dirección Norte-Sur. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

## TRANSPORTE SUR-NORTE

A continuación, se presentan en la siguiente gráfica los resultados obtenidos para el estudio de la evolución de la capacidad de transporte sólido litoral dirección Sur-Norte.

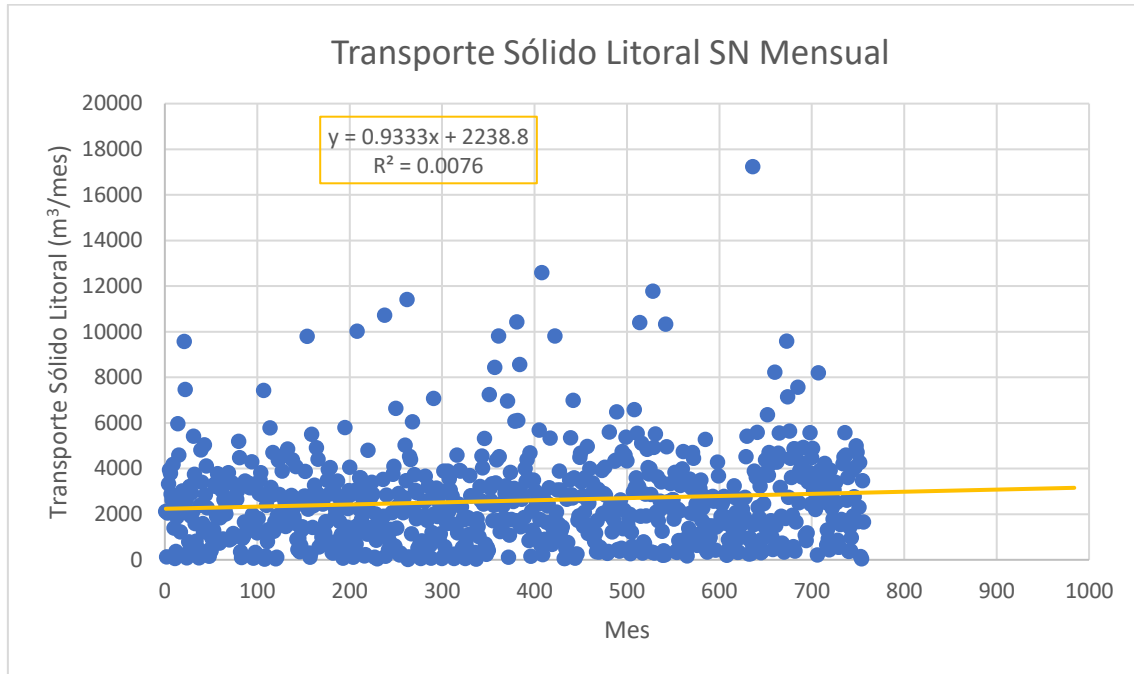


Gráfico 32. Resultados evolución transporte sólido litoral mensual dirección Sur-Norte. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

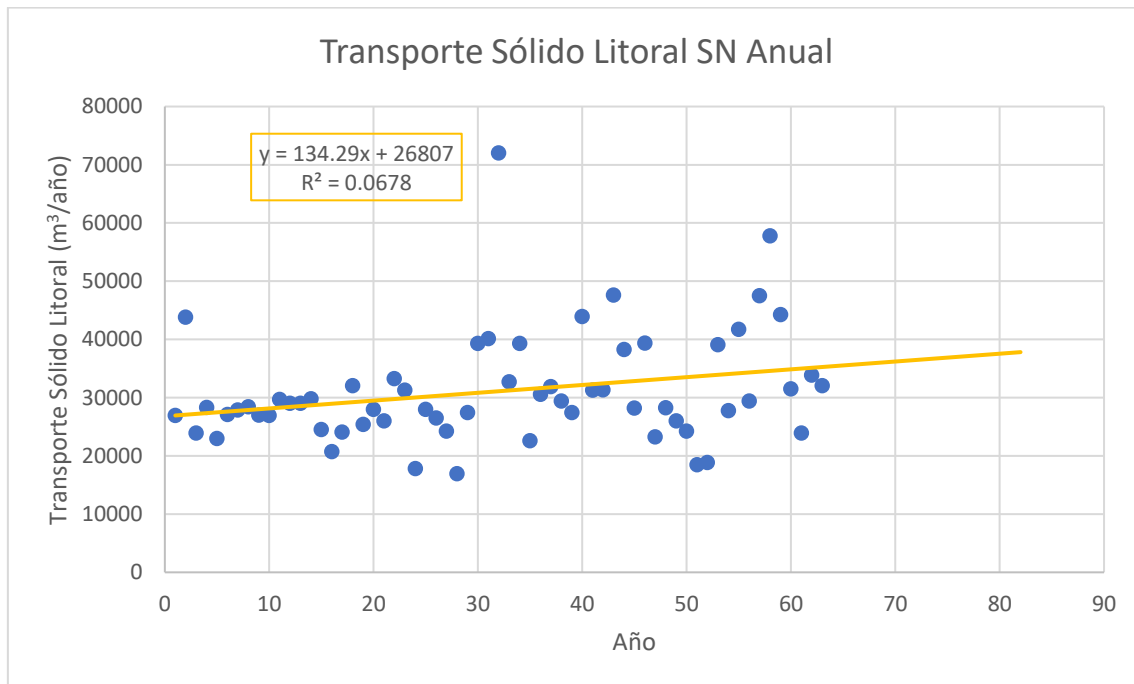
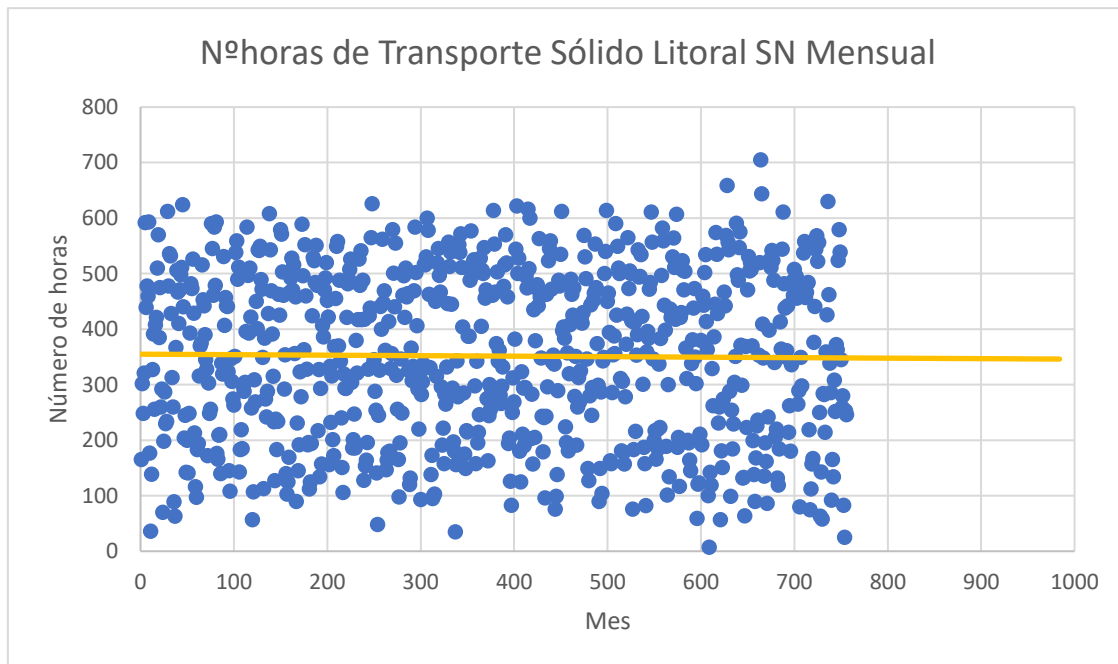


Gráfico 33. Resultados evolución transporte sólido litoral anual dirección Sur-Norte. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

Respecto al número de horas en que el transporte sólido litoral se producirá según la dirección Sur-Norte, se muestra en la siguiente gráfica:



**Gráfico 34. Resultados de la evolución del número de horas en que el transporte sólido litoral tiene la dirección Sur-Norte. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).**

Para la posterior aplicación a la alimentación artificial de un tramo de costa, además de estudiar la evolución de la capacidad de transporte sólido según ambas direcciones, resulta de gran trascendencia estudiar el transporte sólido bruto y neto.

El transporte sólido litoral bruto se refiere a la suma total del transporte sólido, es decir, la suma según las direcciones tanto Norte-Sur como Sur-Norte. Como los resultados obtenidos para ambas direcciones son crecientes, cabe esperar también una tendencia creciente en los datos.

El transporte sólido litoral neto es la variable de mayor importancia cara a la posterior aplicación. Se entiende como la resta entre el transporte sólido según la dirección predominante, en este caso y para todo el litoral valenciano, la dirección Norte-Sur y la dirección opuesta, en este caso Sur-Norte.

A partir del transporte sólido litoral neto es posible calcular el volumen de sedimentos que se transportarán a lo largo del tramo objeto de estudio.

## TRANSPORTE BRUTO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el transporte sólido litoral bruto:

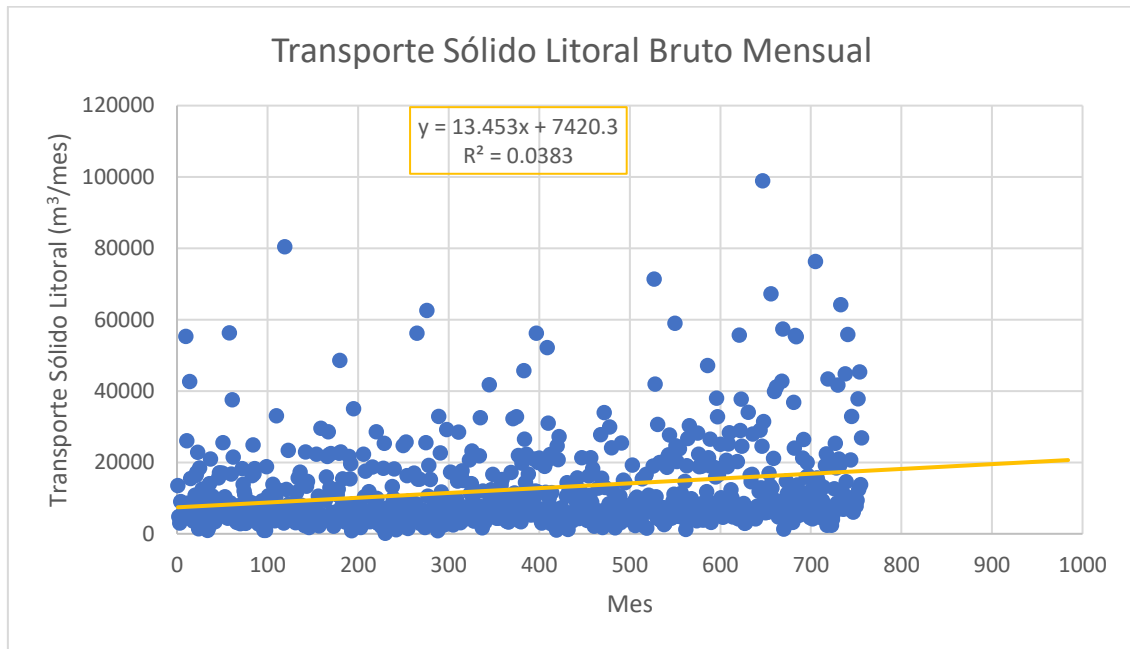


Gráfico 35. Resultados evolución transporte sólido litoral bruto mensual. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

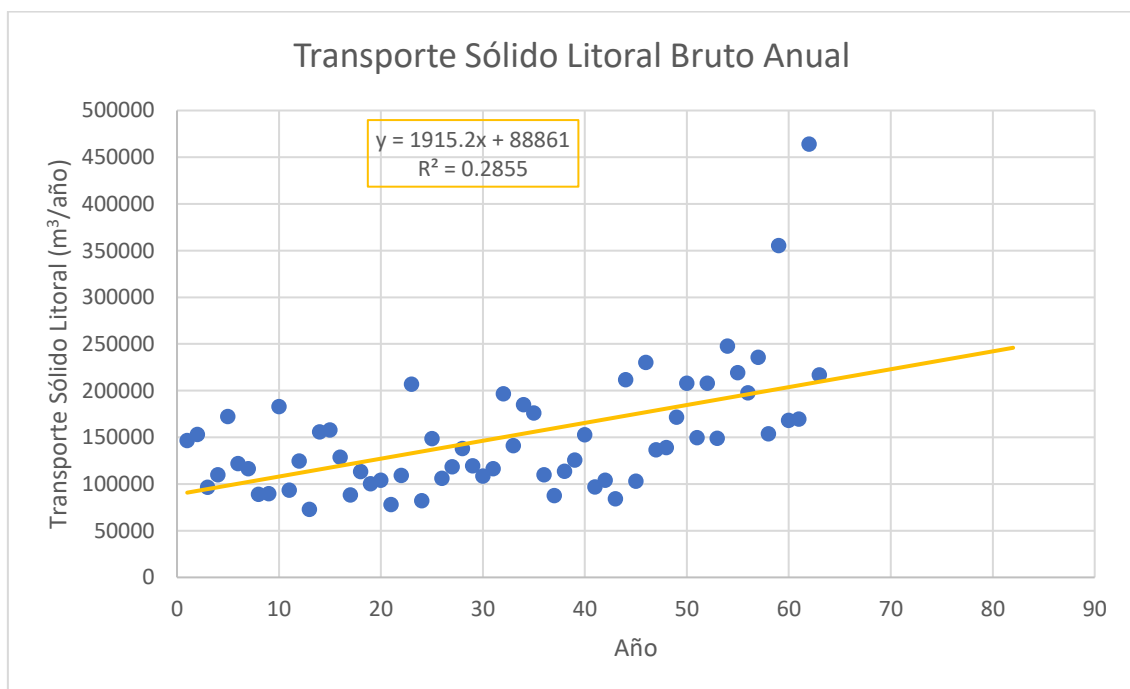
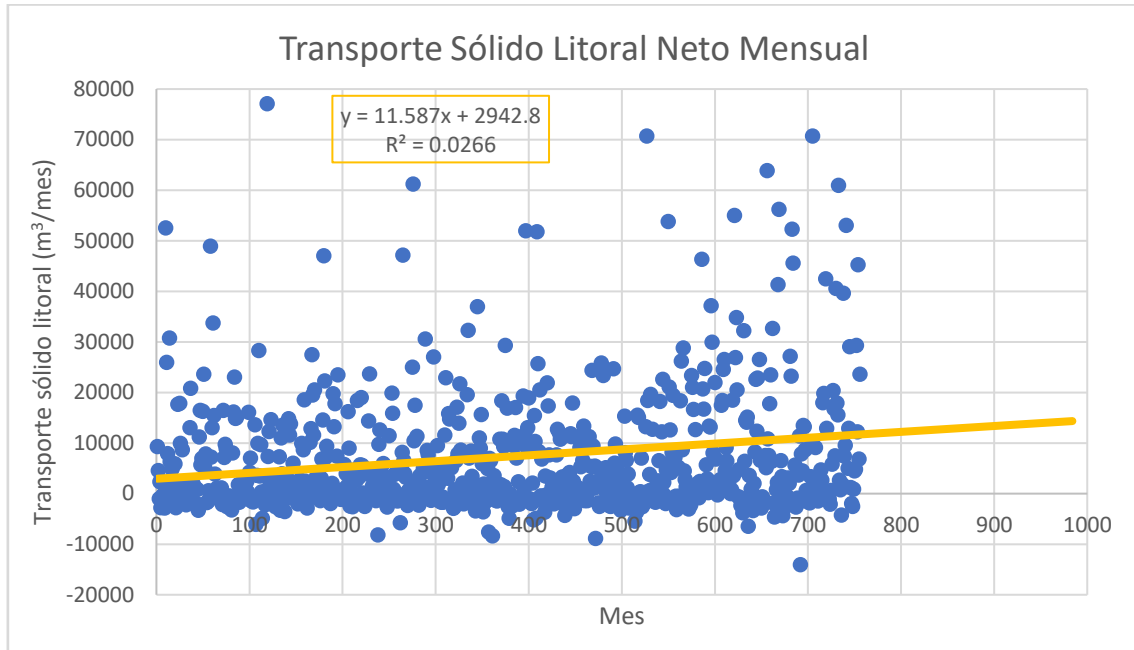


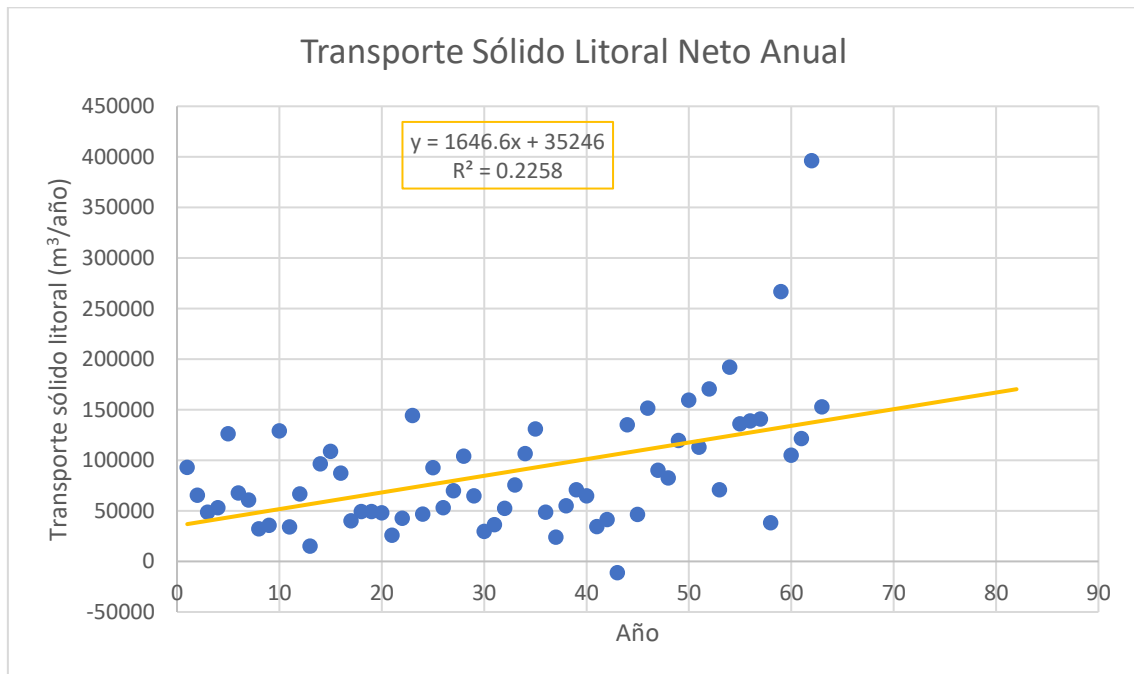
Gráfico 36. Resultados evolución transporte sólido litoral bruto anual. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).

## TRANSPORTE NETO

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el transporte sólido litoral neto:



**Gráfico 37.** Resultados evolución transporte sólido litoral neto mensual. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).



**Gráfico 38.** Resultados evolución transporte sólido litoral neto anual. Fuente: elaboración propia en Microsoft Excel (2022).



### 6.3.3 Conclusiones

Del mismo modo que los resultados correspondientes a la primera metodología de análisis de evolución de la tendencia de los datos, se observa una tendencia creciente en la evolución del transporte de sedimentos desde el año 1958, con lo que se evidencia el gran retroceso de la línea de costa vivido en ciertos subtramos del tramo objeto de estudio y, además, los pronósticos nos aseguran desequilibrios sobre la línea de costa durante los próximos 20 años de manera más acentuada a los vividos hasta la fecha.

Del mismo modo que durante el análisis de las tendencias realizado con la primera metodología de trabajo, la pendiente creciente del transporte de sedimentos Norte-Sur, es mayor que la Sur-Norte, por lo que el transporte neto de sedimentos también evidenciará un aumento en su tendencia.

Por otro lado, no se observa una tendencia creciente ni en el número de horas en que se produce el transporte de sedimentos en dirección Norte-Sur ni en el número de horas en que se produce dirección Sur-Norte, de lo cual se extrae en conclusión que el aumento de la capacidad de transporte puede ser debido al aumento de temporales extremos según ambas direcciones ya que durante los mismos es cuando el transporte de sedimentos se produce de la manera más drástica. También puede ser debido a un aumento en la altura de la ola media, sin embargo, las previsiones elaboradas por los principales organismos climáticos no aseguran esta última hipótesis.

En cuanto al orden de magnitud del transporte neto de sedimentos para el tramo objeto de estudio, se observa como este ha sufrido un aumento de más del 100%. En el año 1958, el transporte de sedimentos se encontraba en torno a 40.000 m<sup>3</sup>/año, mientras que para el año 2021, su valor se encuentra en torno a 130.000 m<sup>3</sup>/año. El pronóstico esperado para el año 2040, es que este valor se encuentre en torno a 165.000 m<sup>3</sup>/año aproximadamente.

Una vez se dispone del pronóstico de transporte neto para el tramo objeto de estudio, es posible realizar un cálculo del volumen de sedimentos que se movilizarán a lo largo de la línea de costa en estos 20 años próximos, de modo que se plantea una solución para que no se produzcan mayores erosiones a las vividas hasta ahora sobre la misma.

Previo a ello, conviene estudiar cómo ha evolucionado la línea de costa del tramo objeto de estudio durante las últimas décadas, para ver como este transporte de sedimentos en aumento ha afectado a la línea de costa durante este período de tiempo.

## 6.4 Evolución línea de costa entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera

La línea de costa en las últimas décadas ha sufrido grandes erosiones en ciertas zonas, mientras que en otras se ha producido el efecto contrario, acreciones.

La existencia de barreras al transporte, ya sean paralelas o perpendiculares a la orilla, pueden modificar la línea de costa, como por ejemplo el Puerto de Valencia o cualquier otro puerto. Generalmente, cuanto mayor sea esta barrera al transporte de sedimentos, mayores consecuencias se producirán sobre la línea de orilla.

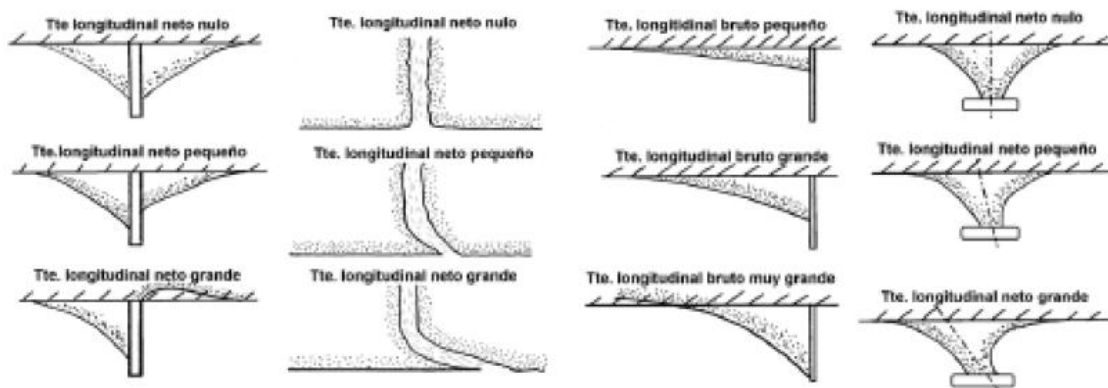


Figura 33. Evidencias morfológicas del transporte sólido longitudinal. Fuente: De la Peña (2007).

Para el estudio de la evolución en la línea de costa del presente tramo objeto de estudio comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera, se divide el mismo en 4 subtramos, separados entre ellos por barreras al transporte sólido:

**SUBTRAMO 1:** Playa de Pinedo – Gola del Pujol.

**SUBTRAMO 2:** Gola del Pujol – Gola del Perellonet.

**SUBTRAMO 3:** Gola del Perellonet – Gola del Perelló.

**SUBTRAMO 4:** Gola del Perelló – Cabo de Cullera.

En cada uno de estos subtramos, según su posición más cercana al Puerto de Valencia o al Cabo de Cullera, se ha sufrido en las últimas décadas un efecto diferente sobre la línea de orilla.

Respecto a la metodología empleada para el estudio de la evolución de la línea de costa, se analiza mediante el uso de ortofotos históricas obtenidas del Visor Cartográfico (GVA) desarrollado por el Instituto Cartográfico Valenciano.

Para determinar cómo ha evolucionado la línea de costa se han empleado imágenes correspondientes a los años 1956, 2000, 2021 y el pronóstico de línea de costa generado para el año 2040, estimado a partir de los pronósticos de subida del nivel medio del mar.

El pronóstico de subida del nivel del mar, así como el retroceso de la línea de costa de 7.5 metros, se desarrollan en el apartado 6.5 durante el cálculo del volumen necesario para la alimentación artificial.

A continuación, se muestran las figuras correspondientes en las que se describirá la acreción o erosión sufrida a lo largo del tramo objeto de estudio, en caso de no actuar sobre el mismo:

## SUBTRAMO 1

Desde la construcción del Puerto de Valencia, barrera total al transporte de sedimentos, este primer subtramo objeto de estudio ha sufrido una gran erosión en su línea de costa, llegando a retroceder desde el año 1956 hasta la actualidad, un total de 100 metros en la playa de Pinedo.

La playa de Pinedo, por ser la más próxima al Puerto de Valencia, es la que mayor erosión ha sufrido mientras que otras playas, tales como la Playa del Saler, también han sufrido fuertes erosiones, aunque no de modo tan acentuado.

Desde el año 2000 se siguen sufriendo erosiones a lo largo de todo el tramo, esperando un mayor retroceso de la línea de costa para el año 2040, de en torno a 7,5 metros, debido a la subida media del nivel del mar de 0,15 m.



Figura 34. Evolución de la línea de costa en el subtramo Playa de Pinedo - Gola del Pujol. Fuente: Visor GVA (2021).

## SUBTRAMO 2

En este segundo subtramo objeto de estudio, debido a que ya no se encuentra tan próximo al Puerto de Valencia, las erosiones no son tan acentuadas, sin embargo, siguen produciéndose.

Desde el año 2000 hasta la actualidad, se observa una erosión generalizada a lo largo de todo el tramo, con el consiguiente aumento de la erosión esperada para los próximos años, del mismo modo que el esperado para el primer subtramo.

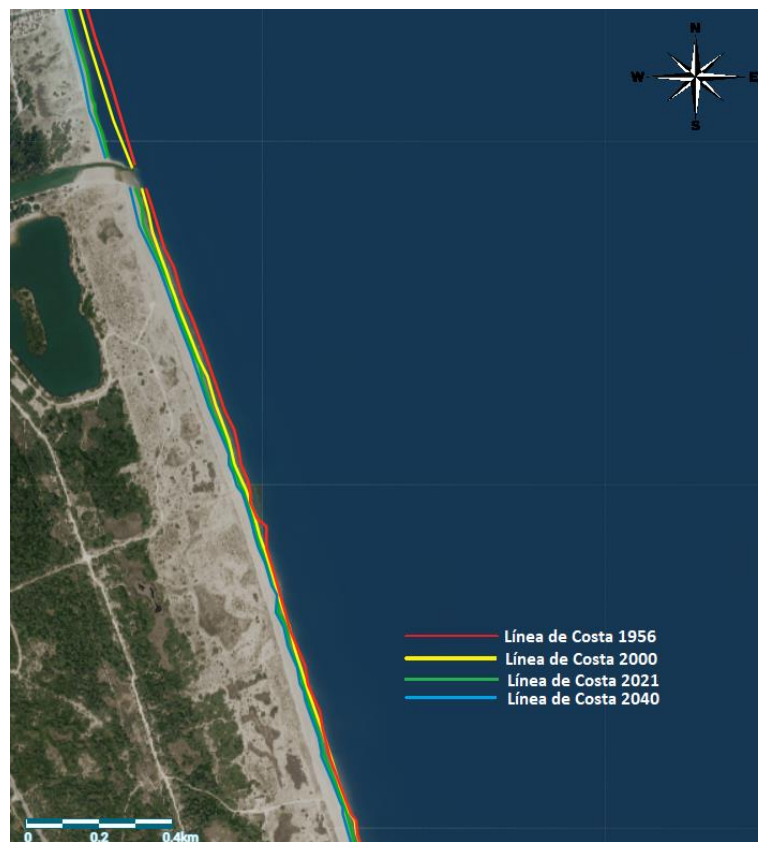
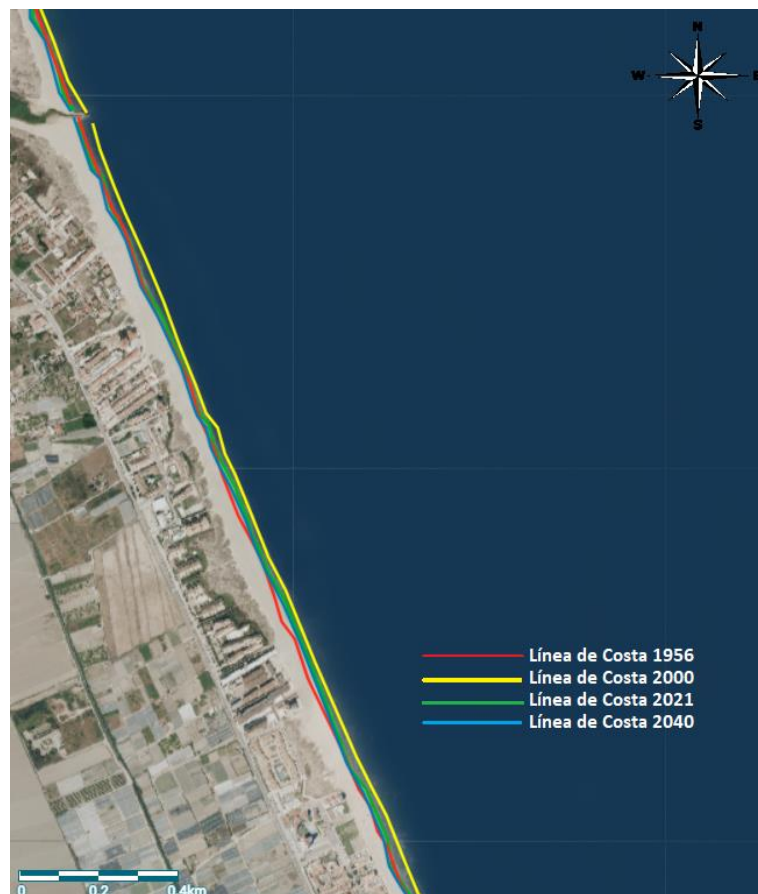


Figura 35. Evolución de la línea de costa en el subtramo Gola del Pujol - Gola del Perellonet. Fuente: Visor GVA (2021).

### **SUBTRAMO 3**

En este tercer tramo objeto de estudio, se observa una erosión generalizada para el subtramo completo desde el año 2000 hasta la actualidad.

Sin embargo, comparando los años 1956-2000, a lo largo de estas décadas se produjo una acreción en la línea de costa, provocada en parte por la construcción de la Gola del Perelló, provocando una retención en el transporte de sedimentos con su consecuente aumento de la línea de costa.



**Figura 36.** Evolución de la línea de costa en el subtramo Gola del Perellonet - Gola del Perelló. Fuente: VISOR GVA (2021).



## SUBTRAMO 4

En este cuarto y último subtramo, comprendido entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera, la evolución de la línea de costa se ha producido de manera muy similar al tercero, donde desde el año 2000 hasta la actualidad se ha producido una erosión casi generalizada para todo el tramo; sin embargo, se trata del subtramo en el que menor retroceso de línea de costa se ha producido. Ello es debido, a que se trata del tramo más alejado del Puerto de Valencia, además de contar con el Cabo de Cullera, tratándose este, de una barrera al transporte de sedimentos, provocando acreción a barlovento del mismo.

Del mismo modo y por las mismas razones que en el tercer subtramo también, durante el período de tiempo comprendido entre 1956-2000 se produjo una acreción de la línea de costa.



Figura 37. Evolución de la línea de costa en el subtramo Gola del Perelló - Cabo de Cullera. Fuente: VISOR GVA (2021).



## 6.5 Volumen necesario para la alimentación artificial

La determinación de los volúmenes de aportación necesarios se ha llevado a cabo a través de los siguientes trabajos:

- Cálculo de la capacidad de transporte sólido de sedimentos
- Subida del nivel medio del mar debido al cambio climático

Considerar el transporte litoral futuro, así como la subida del nivel del mar para estimar la cantidad de arena necesaria que compense esta subida durante parte del siglo XXI, posibilita que se trate de medidas eficientes en el largo plazo.

### 6.5.1 Volumen necesario debido a la capacidad de transporte de sedimentos

La determinación del volumen necesario a disponer sobre el tramo objeto de estudio para anticipar los efectos del transporte longitudinal de sedimentos durante los próximos 20 años se puede estimar por medio de la regresión lineal simple previamente expuesta.

Se emplea la ecuación de la regresión lineal simple obtenida para el transporte neto, y se efectúa un pronóstico para los 228 meses restantes previos al año 2040.

$$y = 11,587x + 2942,8 \quad (18)$$

Realizados los cálculos, el volumen estimado es de **2.970.680 m<sup>3</sup>**. Se escoge un valor de **3.000.000 m<sup>3</sup>** para los futuros dimensionamientos.

Este mismo cálculo se podría efectuar anualmente. La diferencia entre el volumen necesario si el cálculo se realiza anual o mensualmente es mínima, como se muestra a continuación:

- Volumen requerido anual: 2.953.510 m<sup>3</sup>.
- Volumen requerido mensual: 2.970.680 m<sup>3</sup>.

### 6.5.2 Volumen necesario debido a la subida del nivel del mar

La subida del nivel del mar es una realidad, como muestran los principales informes emitidos por las principales organizaciones climáticas.

Esta subida del nivel del mar se estima que producirá una gran erosión sobre la costa con el respectivo retroceso de la línea de orilla y la pérdida de playa asociada. A esta erosión, también es posible denominarla erosión generalizada, ya que afecta a toda la costa sin diferenciar las zonas que actualmente se encuentran en erosión o acreción.

En condiciones de equilibrio, el perfil y la forma en planta de una playa atienden al balance de sedimentos originado por el oleaje. Le elevación del nivel del mar y, por tanto, la modificación de la línea de costa, suponen cambios en el clima marítimo y el transporte de sedimentos.

Frente a esta situación, el perfil de la playa se ve modificado desde la nueva línea de orilla hasta la profundidad de cierre. Se produce un retroceso en la línea de costa que lleva asociado un volumen de arena necesario para restablecer el perfil original.

La tasa de retroceso de la playa depende del nivel del mar esperado entre otras variables como lo son el transporte de sedimentos o la altura de la berma.

De manera teórica, se propone para este cálculo la Regla de Bruun (Bruun, 1962), que relaciona la subida del nivel del mar con la recesión en la línea de costa provocada por esta subida. Este método considera que la costa se encuentra en equilibrio cuantitativo y, por tanto, la cantidad de material que entra es igual a la que sale; el perfil se mueve sin cambiar su forma y no requiere una forma específica para el perfil de equilibrio (De la Peña et al., 2018). Los parámetros intervinientes son los siguientes:

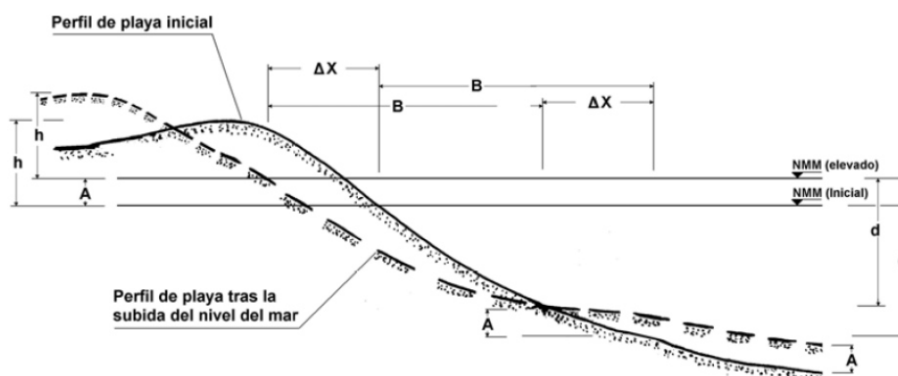


Figura 38. Variables que intervienen en la Regla de Bruun (1962). Fuente: De la Peña (2007).

$$AB = \Delta X (h + d) \quad (19)$$

$$\Delta X = \frac{AB}{h + d} = \frac{A}{\tan\theta}$$

Siendo:

A	Subida del nivel del mar
B	Distancia entre la línea de orilla y la profundidad de cierre
AB	Cantidad de material por unidad de longitud necesaria para restablecer la elevación del fondo sobre una distancia B
$\Delta X$	Retroceso de la orilla (erosión)
h	Altura de la berma
d	Profundidad de cierre
$\tan\theta$	Pendiente promedio sobre el perfil activo

Por tanto, se realiza una estimación de los parámetros intervinientes en el cálculo del volumen necesario:

### **ALTURA DE BERMA (h)**

Se escoge una altura de berma de 1 metro, del mismo modo en que el IH Cantabria lo realiza en sus informes de previsión de retroceso de línea de costa.

### **PROFUNDIDAD DE CIERRE (d)**

La profundidad de cierre representa el límite imaginario que define el área donde tienen lugar multitud de procesos litorales, como puede ser el transporte transversal de sedimentos y por tanto resulta una herramienta fundamental en la ingeniería de costas. Se puede definir la profundidad de cierre, por tanto, como la mayor profundidad en la que no hay un cambio significativo en la elevación del fondo, ni un transporte neto de sedimentos significativo entre la costa y el mar.

Es decir, se trata del punto de la playa la que ya no se produce transporte de sedimentos y por tanto los fenómenos englobados en la dinámica litoral no actúan.

Además, este punto coincide con un cambio en la tendencia de los sedimentos. El valor  $D_{50}$  de la arena disminuye desde la orilla hasta la profundidad de cierre, a partir de la cual su diámetro vuelve a aumentar (Aragonés et al., 2019).

Existen varias formas de estimar la profundidad de cierre (PdC) en una playa, a continuación, se muestra alguna de las formulaciones más reconocidas por los expertos y que de mayor validez disponen:

$$\text{Hallermeier: } d = 2,28 * H_{12} - 68,90 * \left(\frac{H_{12}^2}{gT^2}\right) \quad (20)$$

$$\text{Birkemeier: } d = 1,75 * H_{12} - 57,90 * \left(\frac{H_{12}^2}{gT^2}\right) \quad (21)$$

Siendo:

d: Profundidad de cierre (m)

$H_{12}$ : Altura de ola significativa excedida doce horas en régimen medio (m)

g: Aceleración gravitacional ( $m/s^2$ )

T: Período del oleaje (s)

En el caso específico del tramo de costa objeto de estudio del presente trabajo, se caracterizará la profundidad de cierre del tramo situado entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera.

Para la estimación de la profundidad de cierre de las playas que conforman el tramo, el presente estudio se apoya en un método desarrollado en los últimos años, el cual permite estimar esta profundidad con una alta fiabilidad en la costa valenciana.

En primer lugar, Aragonés et al. (2019) analizó los diferentes perfiles de playa de la costa valenciana con el fin de dar un valor preciso de este parámetro en la zona. De sus resultados, se determina que cuanto mayor es el período de tiempo estudiado, la profundidad de cierre aumenta. Para un período de análisis de 20 años, su valor es de **5,92** metros en la playa de La Dehesa, siendo esta una de las playas que conforman el tramo objeto de estudio.

En otro método de análisis realizado en las playas de la Comunidad Valenciana también estudiando períodos de hasta 20 años, Aragonés et al. (2018) comparó los resultados obtenidos mediante el análisis de datos sedimentológicos y los obtenidos mediante las fórmulas descritas previamente. Los valores se muestran en la siguiente tabla:

	Sedimentología	Hallermeier	Birkemeier
Profundidad de cierre (m)	4-6	7.7-8.7	5.8-6.6

Tabla 3. Valores de profundidad de cierre en playas valencianas para T=20 años. Fuente: Aragonés et al. (2018).

Una vez expuesto el procedimiento de cálculo de la profundidad de cierre, del mismo modo que Aragonés et al. (2019), se escoge un valor de 5,92 metros para un período de análisis de 20 años.

### SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR (A)

Respecto a la subida del nivel del mar, y empleando las fuentes de información descritas en el tercer punto del presente estudio, donde quedaba expuesta la información respectiva a los pronósticos de las variables climáticas sobre la Costa de Valencia, se estima una elevación del nivel del mar para el año 2040 de **0,15 metros**, como se muestra en las siguientes imágenes extraídas del visor C3E, desarrollado por el IH Cantabria:

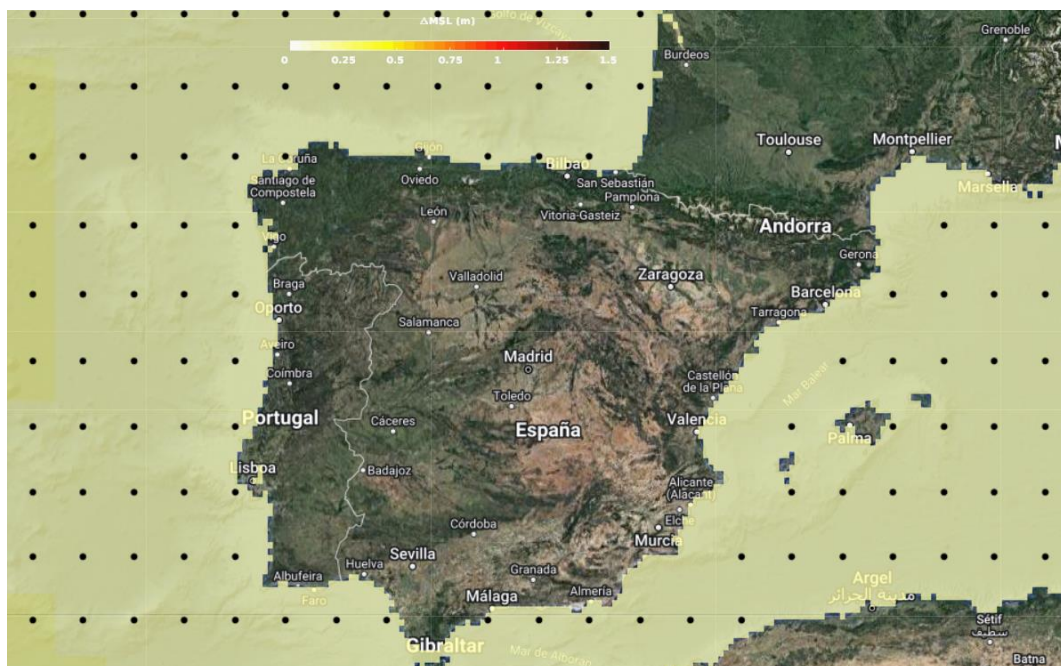


Figura 39. Estimación del aumento del nivel del mar sobre la Península Ibérica según el escenario de emisiones RCP4.5 para el año 2040. Fuente: Visor C3E IH Cantabria (2015).

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera (Valencia).



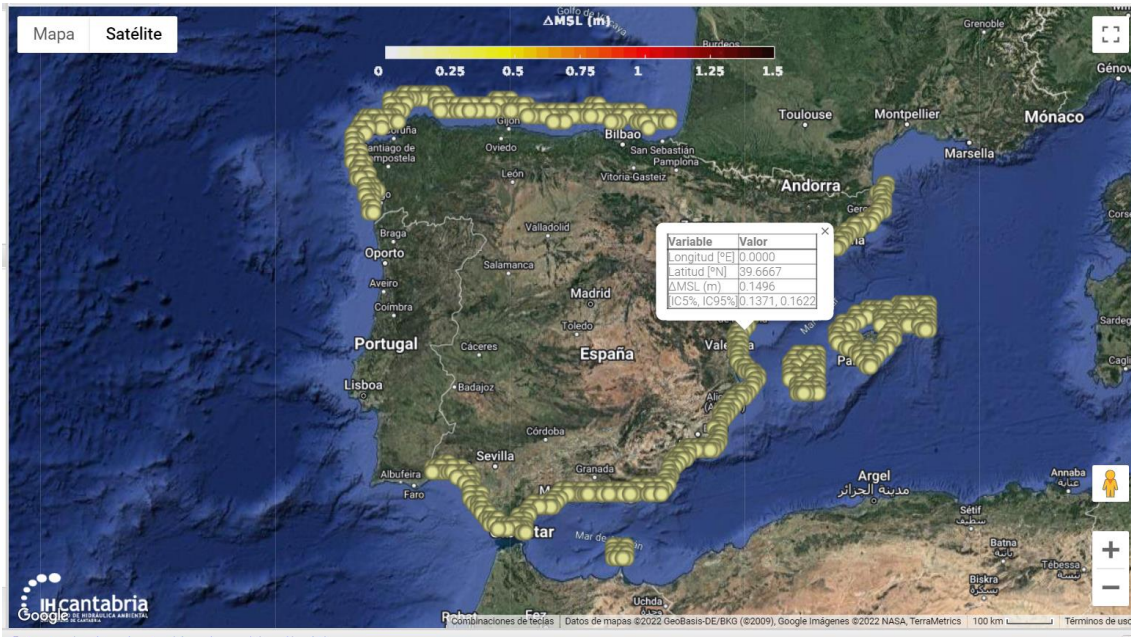


Figura 40. Estimación del aumento del nivel del mar sobre la línea de costa de la Península Ibérica según el escenario de emisiones RCP4.5 para el año 2040. Fuente: Visor C3E IH Cantabria (2015).

### DISTANCIA ENTRE LÍNEA DE ORILLA Y PROFUNDIDAD DE CIERRE (B)

Definida la profundidad de cierre, y haciendo uso de las batimetrías proporcionadas por el MITECO, es posible determinar esta distancia:

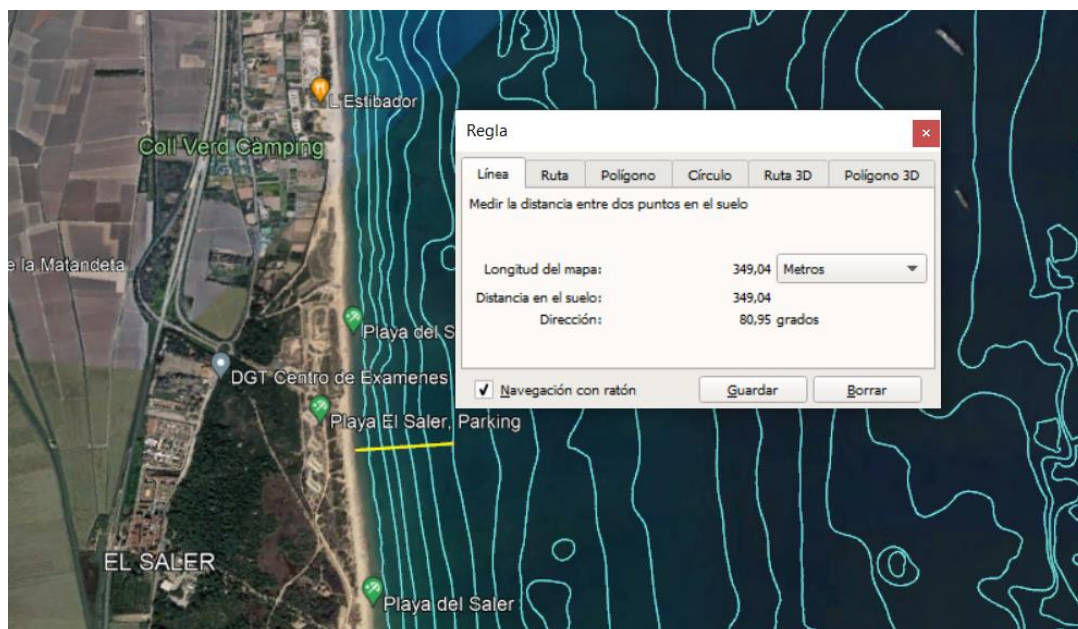


Figura 41. Estimación parámetro B, distancia línea de orilla-profundidad de cierre. Fuente: MITECO (2022).

Se dispone de 350 metros de distancia entre la línea de orilla y la profundidad de cierre de 6 metros aproximadamente.

Aplicada la regla de Bruun y estimado el valor de todos los parámetros influyentes, los resultados obtenidos son:

$\Delta X = 7,5 \text{ m}$ . Se producirá un retroceso de la línea de costa de 7,5 metros en el año 2040, suficiente para poner en riesgo zonas urbanizadas existentes. Valor razonable según las estimaciones del MITECO de 50-100 metros de retroceso de línea de costa por cada metro de subida del nivel del mar para el año 2040.

$AB = 52,5 \frac{\text{m}^3}{\text{unidad de longitud}}$ . El volumen necesario para paliar los futuros efectos de la subida del nivel del mar es de 52,5 metros cúbicos por unidad de longitud.

La longitud del tramo objeto de estudio es de 26,6 km aproximadamente.

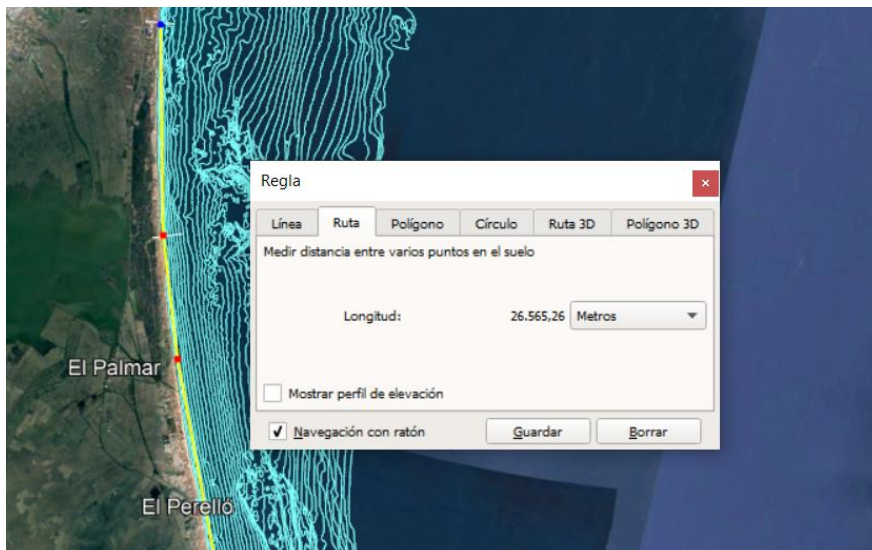


Figura 42. Longitud tramo playa del Saler-Cabo de Cullera. Fuente: Google Earth (2022).

Por tanto, el cálculo del volumen necesario para todo el tramo resulta del siguiente modo:

$$AB = 52,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}} * 26.600 \text{ m} = 1.396.500 \text{ m}^3 \approx \mathbf{1.400.000 \text{ m}^3}$$
 aproximadamente.



### 6.5.3 Volumen total

Una vez estimado el volumen necesario para paliar los efectos de la subida del nivel del mar, así como para anticiparse al futuro transporte longitudinal de sedimentos, en la siguiente tabla se muestra el volumen total necesario.

VOLUMEN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	1.400.000 m <sup>3</sup>
VOLUMEN SUBIDA NIVEL DEL MAR	3.000.000 m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN TOTAL</b>	<b>4.400.000 m<sup>3</sup></b>

Tabla 4. Cálculo volúmenes necesarios para llevar a cabo la alimentación artificial. Fuente: elaboración propia.

## 6.6 Yacimiento de material sedimentario

En cuanto a la extracción necesaria de arena para llevar a cabo la propuesta de alimentación del tramo correspondido entre el sur del Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera, se cuenta con un yacimiento de materiales aptos sedimentario, localizado en la Zona 15 de Valencia, frente a Cullera, a una distancia mínima de unos 10 km y a una profundidad de entre 60 y 80 m.

Este yacimiento cuenta con una Declaración de Impacto Ambiental del proyecto “Extracción de arena en aguas profundas de Valencia para alimentación de playas (Valencia)” (BOE núm 237, 3-10-2013, Sec. III 81334-81357). Sin embargo, esta DIA se debe volver a realizar ya que las extracciones previstas no se iniciaron en los 8 años posteriores a su aprobación.



Figura 43. Ubicación del yacimiento. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica (2018).

Es considerado un yacimiento estratégico por el gran volumen de sedimentos explotables, el hecho de que estén libres de contaminación química y bacteriológica, y por su proximidad a las áreas de demanda, estando situado frente al tramo de actuación, a una distancia mínima.

El área de actuación tiene una extensión de unos 25,5 km<sup>2</sup> y un volumen de arena aproximado de 90 millones de m<sup>3</sup>. En su mayoría se encuentra compuesto por arenas medias con una calidad y tamaño de granos adecuados para la regeneración de playas. En general, se encuentra cubierto por una capa de finos de espesor variable con un valor frecuente de 0,5 metros, aunque en algunos puntos es incluso nula.

Respecto a la extracción de material, situado en aguas profundas y conforme al proyecto existente, se realizará mediante el uso de medios técnicos específicos tales como lo son las dragas de succión de arrastre tipo Jumbo.

La zona 15 se ha dividido en 5 polígonos (A, B, C, D y E) y se plantea la posible extracción de material de todos ellos excepto del polígono E, por presentar un porcentaje de contenido en finos más elevado que el resto y por su ubicación más alejada, estando situado en un extremo del área de actuación. La caracterización del área de estudio se realiza conforme se observa en la figura 44.

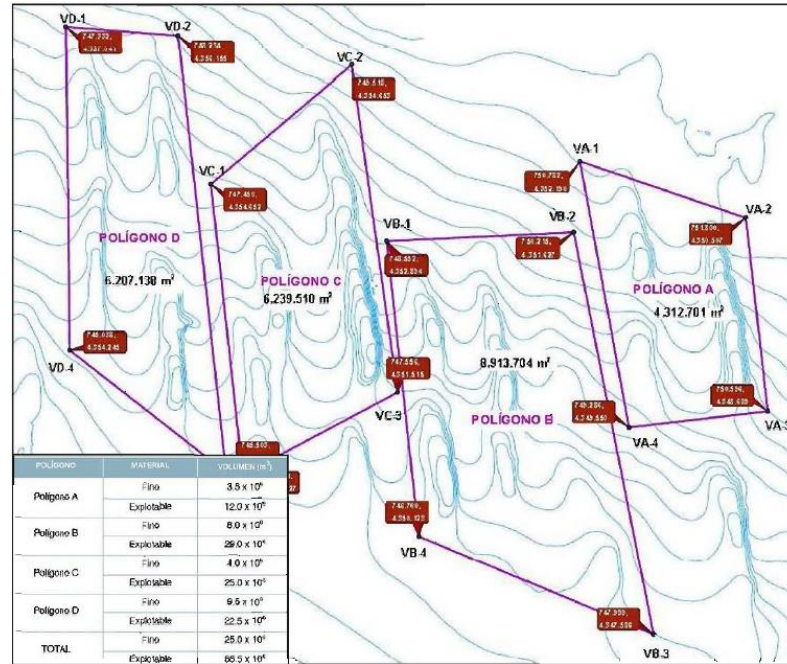


Figura 44. Polígonos de extracción de sedimentos. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica (2018).

El área de extracción y volumen estimado de arena utilizable de los cuatro polígonos se muestra a continuación.

	Área de extracción (m <sup>2</sup> )	Volumen de arena estimado (millones de m <sup>3</sup> )
Polígono A	4.312.701	12
Polígono B	8.913.704	29
Polígono C	6.239.510	25
Polígono D	6.207.138	22,5
	Total	88,5

Tabla 5. Área de extracción y volumen de arena de cada polígono. Fuente: García y Moreno (2010).

Como fuente de información, los documentos que utilizó Alguacil en el año 2020 y que también se emplean en el presente trabajo para el estudio de extracción son:

- Estudio geofísico marino en Valencia y Alicante.
- Ampliación del Estudio Geofísico marino en la costa de Valencia y Alicante hasta la profundidad de 80 metros y Complementario nº1 de la Ampliación del Estudio Geofísico marino en la costa de Valencia y Alicante.

- Estudio de caracterización sedimentológica y bionómica de zonas en aguas profundas de Valencia y Alicante.
- Estudio Ecocartográfico del litoral de las provincias de Valencia y Alicante.

A partir de estos estudios, se obtiene el volumen de material apto para la regeneración (arena media y gruesa), y el volumen de finos de cada zona. La proporción media de material fino del yacimiento es del 22%.

	Material	Volumen (m <sup>3</sup> )
Polígono A	Fino	3.500.000
	Utilizable	12.000.000
Polígono B	Fino	8.000.000
	Utilizable	29.000.000
Polígono C	Fino	4.000.000
	Utilizable	25.000.000
Polígono D	Fino	9.500.000
	Utilizable	22.500.000
Total	Fino	25.000.000
	Utilizable	88.500.000

**Tabla 6. Volúmenes de material obtenidos en estudios anteriores. Fuente: García y Moreno (2010).**

Siguiendo la proporción entre la cantidad de material fino y el volumen utilizable determinada en estudios previos, se obtiene el volumen de material apto para la regeneración de playas que ofrece cada uno de los polígonos.

	Volumen (m <sup>3</sup> )
Polígono A	20.512.350
Polígono B	41.443.495
Polígono C	29.870.030
Polígono D	29.154.015
Volumen total	120.979.890
Volumen total de material apto	94.332.337

**Tabla 7. Volúmenes de material aptos para regeneración de cada polígono. Fuente: García y Moreno (2010).**

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera (Valencia).

Por tanto, una vez expuesta la siguiente información, se considera que el yacimiento de sedimentos de Cullera dispone de material adecuado y en cantidad suficiente para el comienzo de los trabajos de regeneración de playas en el tramo objeto de estudio. Cabe mencionar que existen otros bancos de material en la zona cuyo estudio podría permitir que se utilizaran con el mismo fin en caso necesario, sin embargo, dada la proximidad del yacimiento, así como los no elevados volúmenes de sedimento requeridos del yacimiento en comparación con el totalmente disponible, se decide extraer el mismo del yacimiento de Cullera.

## 6.7 Caracterización de sedimentos

Profundizando en el óptimo aporte de sedimentos del yacimiento al tramo de costa objeto de estudio, se lleva a cabo un breve estudio de la caracterización de sedimentos.

Resulta necesario llevar a cabo esta caracterización de sedimentos ya que los sedimentos a disponer en cierta área deben estar compuestos por un material con unas características granulométricas adecuadas que garanticen su estabilidad en la playa.

Los depósitos de arena presentan diferente dragabilidad en función de la granulometría y compacidad del suelo.

De acuerdo con la granulometría, las arenas se clasifican como:

- Arenas gruesas: 2 – 0,6 mm.
- Arenas medias: 0,6 – 0,2 mm.
- Arenas finas: 0,2 – 0,06 mm.

Además del tamaño de las partículas, resulta de gran importancia caracterizar la forma de las partículas (redondeadas, irregulares, angulares) y su textura (rugosa, suave, pulida).

El porcentaje de material fino presente en el sedimento a aportar se trata de uno de los factores limitantes en la selección del material para llevar a cabo la alimentación artificial. Un material es considerado de buena calidad cuando el porcentaje de finos no supera el 5% del total en la distribución granulométrica, minimizando así los efectos derivados del aumento de turbidez y sedimentación del material fino (CEDEX, 2013).

A partir de valores superiores al 10%, la aceptación del material puede ser considerada como dudosa debido principalmente a los efectos ambientales que podría ocasionar sobre la turbidez de las aguas de los alrededores de la zona de vertido.

### 6.7.1 Caracterización del yacimiento

Del “Estudio de extracción de arena en aguas profundas de Valencia para alimentación de playas” (García y Moreno, 2010), se obtuvo una penetración media de 4,80 metros, así como una recuperación media de 4,30 metros.

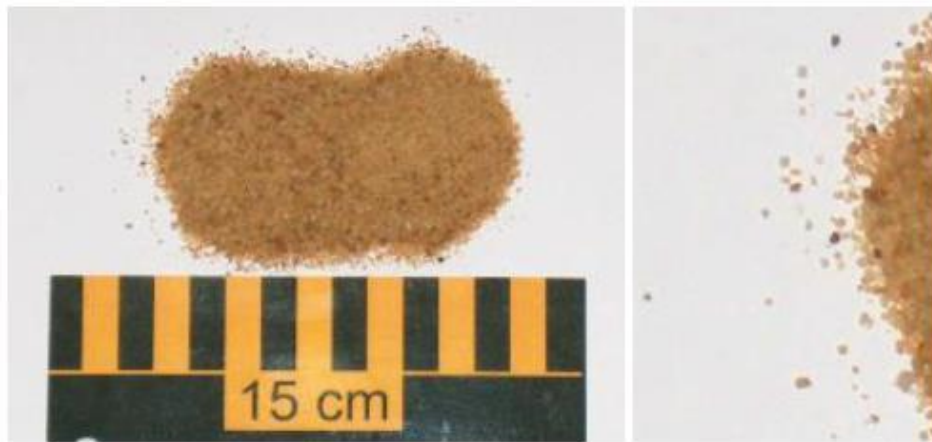


Figura 45. Muestra de arena del yacimiento. Fuente: García y Moreno (2010).

En la siguiente tabla se exponen las características granulométricas medias de las muestras analizadas.

Zona del yacimiento	D <sub>50</sub> con conchas (mm)	D <sub>50</sub> sin conchas (mm)
Polígono A	0,43	0,43
Polígono B	0,36	0,35
Polígono C	0,33	0,33
Polígono D	0,29	0,28
Promedio	0,32	0,32

Tabla 8. Características granulométricas del árido del yacimiento. Fuente: García y Moreno (2010).

La gran extensión del yacimiento favorece que el material de este varíe su granulometría de una zona a otra, siendo la proporción de finos comentada previamente del 22%.

El tamaño de grano medio existente en dicho yacimiento es **D<sub>50</sub>=0,32 mm**.



### 6.7.2 Caracterización arenas Puerto de Valencia-Cabo de Cullera

De acuerdo con el Plan de Ecocartografías del litoral español, se ha realizado una caracterización de las playas que componen el tramo objeto de estudio.

En la siguiente tabla se muestra el tipo de playa, que tipo de sedimento la compone y cuál es su  $D_{50}$  (mm).

Nombre	Tipo de playa	Tipo de sedimento	$D_{50}$ (mm)
Playa de Pinedo	Abierto	Arenas medias	0.57
Playa del Saler	Abierta	Arenas medias	0.48
Playa de Recatí	Abierta	Arenas finas	0.23
Playa del Perelló	Abierta	Arenas medias	0.27
Playa de las Palmeras	Abierta	Arenas finas	0.24
Playa del Rey	Abierta	Arenas medias	0.26
Playa del Mareny	Abierta	Arenas medias	0.29
Playa de San Lorenzo	Abierta	Arenas finas	0.25
Playa del Dosel	Abierta	Arenas finas	0.23

Tabla 9. Características granulométricas del árido del yacimiento. Fuente: Plan de Ecocartografías del litoral español (2022).

El tamaño medio de grano existentes en las distintas playas que componen el tramo objeto de estudio es de 0,31 mm.

El elevado valor del diámetro de la Playa de Pinedo y del Saler respecto a las demás playas puede deberse a que esta playa no esté únicamente compuesta por arenas, sino también por gravas y bolos. Que esté compuesta por materiales de mayor diámetro no quiere decir que no sufra procesos erosivos, es más, estos procesos erosivos son los que han provocado la pérdida del material más fino.

Además, es posible que la caracterización de sedimentos se haya producido tan solo en superficie, siendo importante caracterizar los mismos en orilla y en avance a la profundidad de cierre, por ello, se estima que la granulometría de los sedimentos medios en el tramo objeto de estudio se tratará de aproximadamente la misma que la extraída del yacimiento.

### 6.7.3 Conclusión

Una vez caracterizado tanto el material que se dispone en las playas objeto de estudio, así como el material a disponer de origen el yacimiento sedimentario, se concluye que en valor promedio del  $D_{50}$  del yacimiento (0,32 mm) es prácticamente idéntico que el  $D_{50}$  de las playas analizadas en promedio (0,31 mm).

El material granular óptimo es aquel que posee una granulometría igual o más elevada que el natural constitutivo de la playa (CEDEX, 2013).

Por tanto, se considera que el material a dragar es apto para las actuaciones de regeneración del tramo objeto de estudio.

## 6.8 Estudio del dragado

### 6.8.1 Estudio técnico de la extracción de arena

Una vez conocido el volumen de sedimentos necesario para llevar a cabo la propuesta de alimentación artificial, así como el yacimiento del que se van a extraer los mismos, se procede a realizar un estudio técnico de esta extracción de arenas, es decir, cómo se van a llevar a cabo estas operaciones de dragado, qué equipos se van a emplear para ello, cómo se verterá posteriormente este volumen de sedimentos y cuánto tiempo requerirán estas operaciones.

### ZONA DE DRAGADO

El dragado de material se localizará donde lo esté el yacimiento de material sedimentario. Se deben evitar los yacimientos situados a menos de 50 metros de profundidad, evitar zonas con una cobertura de finos superior a 1,50 metros y evitar materiales que no sean de naturaleza bioclástica.

En el presente trabajo y como se ha estudiado en el respectivo apartado, la zona de interés considerada para comenzar los trabajos de regeneración del litoral valenciano es la Zona 15 (Valencia), por ser la que presenta un importante volumen de material con la calidad adecuada.



## EQUIPO DE DRAGADO

Existen diversos equipos de dragado cuya elección es función del tipo de actuación a realizar. La clasificación de las dragas se muestra a continuación:



Figura 46. Clasificación de las dragas. Fuente: Escalante (2019).

Al tratarse de un proyecto de alimentación artificial de arenas y analizadas las características de la zona de préstamo, vertido y transporte y las aplicaciones de las diferentes dragas disponibles en el mercado, el equipo más adecuado para la alimentación de las playas del Puerto de Valencia hasta el Cabo de Cullera es la draga de succión por arrastre (THSD) tipo Jumbo con una capacidad de cántara mayor de 16.000 m<sup>3</sup>.

Una draga hidráulica de succión en marcha o de arrastre es una embarcación autopropulsada y autoportante que draga de forma continua volúmenes de material en aguas profundas, incluso admitiendo condiciones marítimas desfavorables (Yepes, 2016). Este tipo de dragas representan menos de la cuarta parte del parque mundial de dragas hidráulicas.



Figura 47. Dragas de succión en marcha. Fuente: Yepes, V. (2016)

En cuanto al funcionamiento de esta, el material es aspirado mediante una tubería con cabezal de succión que desagrega los sólidos del fondo marino. La bomba de dragado crea el vacío necesario para poner en suspensión en el agua los materiales sueltos y la mezcla agua-producto es aspirada y depositada en la cántara de la propia draga, pudiendo ser transportada a grandes distancias. En la presente propuesta, la distancia a transportar es mínima. La descarga de este puede realizarse por apertura de fondo o bombeo.

Destaca la capacidad para realizar el transporte y vertido de los materiales dragados de esta maquinaria.

Los componentes del sistema de dragado de la draga de succión en marcha son:

- Bombas de dragado
- Tubos de succión o aspiración
- Cabezales de dragado
- Cántara

Los elementos están diseñados en conjunto para que la operación de dragado sea eficiente, teniendo en cuenta parámetros como la potencia de las bombas, la capacidad de la cántara y el diámetro del tubo de succión.

En la siguiente tabla 10, se muestran algunas de las dragas consideradas para la extracción del material sedimentario (Escalante, 2019).

Draga	Cántara (m <sup>3</sup> )	Profundidad (m)	Calado (m)
Leiv Eriksson (2010)	46.000	155	15,15
Cristóbal Colón (2008)	46.000	155	15,15
Vasco da Gama (2000)	33.000	140	14,60
Volvox Terranova (1998)	20.000	101	11,20
Gerardus Mercator (1997)	18.000	112	11,85

**Tabla 10. Dragas tipo Jumbo. Fuente: Escalante (2019).**

## PROCEDIMIENTO DE DRAGADO

Es necesario minimizar el impacto ambiental para llevar a cabo una correcta operación de dragado, así como los costes económicos. Su definición se basa en el conocimiento previo de los siguientes aspectos:

- Batimetría de la zona de dragado y vertido.
- Características geotécnicas y geológicas del material a dragar.
- Condiciones medioambientales de las zonas involucradas en la operación de dragado.

Se debe establecer un ciclo de dragado que permita elaborar un plan de trabajo. El ciclo de dragado de un equipo de succión por arrastre consiste en una serie continua de ciclos de dragado sencillos, por lo que se trata de diferentes fases ejecutadas una detrás de otra.

Para ello, se han de considerar las adversidades que puedan presentarse y determinar la producción del equipo de trabajo. Las fases del ciclo de dragado se muestran en la figura 48:

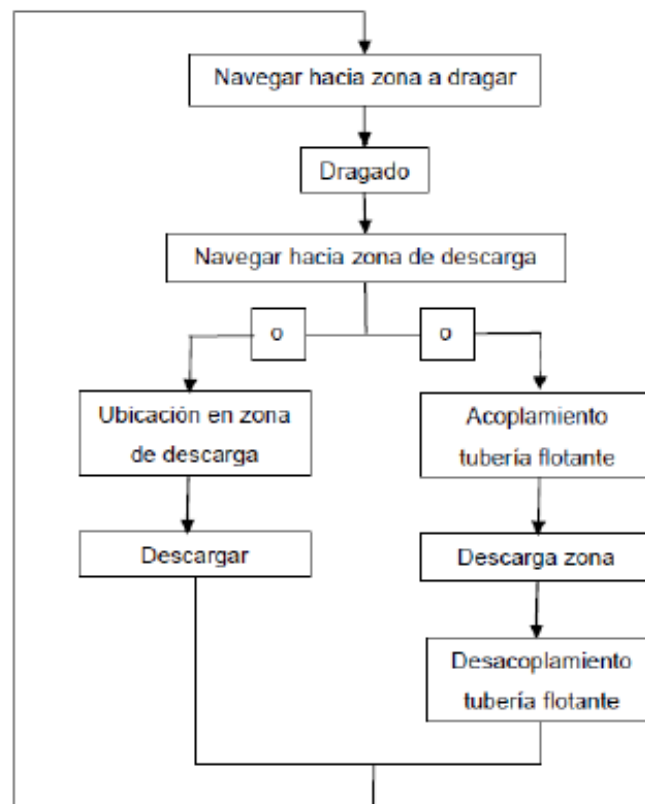


Figura 48. Fases del ciclo de dragado. Fuente: Escalante (2019).

El procedimiento de trabajo y, por tanto, los tiempos que se deben considerar previo a la planificación de los trabajos son: carga de la draga, llenado de la cántara, tiempo de giro, tiempo de navegación con la draga cargada, tiempo de descarga y tiempos de navegación con la draga vacía. Todas estas fases disponen de variaciones en función del procedimiento y maquinaria escogida. Los límites de operatividad también son importantes a considerar.

Un aspecto para destacar es que el contenido de finos dragado será reducido mediante el rebose u overflow de la cántara. A medida que se llena la cántara con la mezcla de agua y sedimento, parte de estos van sedimentando y el agua excedente puede descargarse de vuelta al mar, por tanto, la fracción del material más fino es devuelta al mar junto al agua excedente. De esta forma se optimizará la cantidad de material explotable transportado en cada viaje y se minimizará la turbidez en la costa durante el vertido.

Una vez llena la cántara, la draga transportará las arenas hasta los puntos de posicionamiento de vertido establecidos.

## **VERTIDO Y COLOCACIÓN DEL MATERIAL DRAGADO**

Conocido el volumen de extracción necesario, el procedimiento de dragado y transporte de los sedimentos, se plantea el vertido y colocación de este material dragado.

Para ello, y conocida la evolución de la costa a lo largo de las últimas décadas tras la construcción del Puerto de Valencia, se diferencian subtramos donde se ha sufrido una fuerte erosión con un fuerte retroceso de la línea de costa asociado, como el subtramo 1 comprendido entre la Playa de Pinedo y la Gola del Pujol, y subtramos donde la erosión no es tan notoria como el subtramo 4, comprendido entre la Gola del Perelló y el Cabo de Cullera, tratándose este del subtramo más alejado del Puerto de Valencia.

Además, el transporte sólido sobre el litoral mediterráneo tiene como dirección principal Norte-Sur, como se ha mostrado en el apartado correspondiente a los resultados de la evolución de la tendencia del transporte sólido.

La colocación del material dragado para anticiparse a los efectos del cambio climático y el transporte de sedimentos se realizará disponiendo todo el volumen necesario sobre el subtramo 1 comprendido entre la Playa de Pinedo y la Gola del Pujol.

Se vierte la totalidad del volumen de sedimentos en este primer subtramo, sin embargo, el propio transporte de sedimentos predominante y en aumento con el paso del tiempo en dirección Norte-Sur, se encargará de repartir los sedimentos a lo largo del tramo objeto de estudio.

En el anexo 2, correspondiente a los planos, se encuentra la propuesta de vertido esquematizada.

El subtramo 1 cuenta con una longitud aproximada de 7.000 metros, por lo que se deben disponer de  $\frac{4.400.000 \text{ m}^3}{7.000 \text{ m}} \approx 629 \text{ m}^3/\text{m}$ . Esto provocará un avance de la línea de costa, el cual debe estimarse para la correcta colocación y diseño del material dragado.

Para ello, y conocido el perfil transversal de playa previo a la actuación mostrado en el anexo 2 planos, se plantea el vertido del material dragado regenerando el cordón dunar ya existente.

Los campos de dunas litorales tienen una importancia especial en la protección costera pues sirven de reserva de material y de contención para los grandes temporales. Esta fijación de las dunas se realiza mediante el desarrollo de vegetación tanto de crecimiento natural como de plantación, que con sus raíces sujetan la arena (De la Peña, J.M., 2007).

A lo largo del tramo de colocación de sedimentos, se encuentran zonas que cuentan con una gran longitud de dunas existentes, y otras con una escasa longitud de estas, por tanto, se plantea un escenario medio, donde estas dunas cuentan con una longitud aproximada de 40 metros y una elevación de 9 metros desde la profundidad de cierre de la playa.

Se amplía la anchura del cordón ya existente, disponiendo de una duna más de las mismas dimensiones de altura y de 30 metros mayor de anchura a las ya existentes, es decir de 70 metros de anchura de modo que se consiga la mayor integración paisajística posible.

Por tanto, conocidas las dimensiones geométricas, así como la disposición final del vertido del material dragado, se estima un avance de la línea de costa de 70 metros a lo largo de los 7 kilómetros objeto de alimentación artificial, suficiente para cumplir con el volumen de material requerido de  $629 \text{ m}^3$  por metro lineal.

Para el correcto vertido del material, estos 7 kilómetros de línea de costa se dividen en 8 perfiles equidistantes entre ellos 1 kilómetro. El primer perfil, más cercano al Puerto de Valencia y dispuesto a continuación de los espigones de la Playa de Pinedo, dispondrá de una cantidad material superior al resto para paliar los efectos futuros de erosión sufridos al disponerse tras el espigón.

Esta diferencia de material será compensada disponiendo de una cantidad de material equivalentemente inferior en el último perfil, localizado previo al espigón de la Gola de Pujol, donde es esperada una mayor acumulación de material en el futuro, consecuencia de esta barrera al transporte de sedimentos.

Además, por medio del planteamiento propuesto de vertido del material dragado, se conseguirá equilibrar las diferencias existentes entre la línea de costa del primer y segundo subtramo. La línea de costa del segundo subtramo, comprendido entre la Gola del Pujol y la Gola del Perellonet, se encuentra entre 60 y 70 metros adelantada respecto a la del primer subtramo, debido a que la erosión que ha sufrido durante las últimas décadas, como se ha mostrado en el apartado correspondiente, no es tan acentuada.

La descarga de material desde la draga a la playa se realiza por tubería, acumulándose en la playa y extendiéndose por medio de un equipo formado de retroexcavadora y pala cargadora. Este vertido del material dragado también se puede realizar mediante distintas técnicas como la descarga por compuertas de fondo, o descarga mediante chorro de proa o *rainbowing*, sin embargo, la más adecuada y de menor impacto ambiental es la descarga mediante tubería.

Debido a la longitud del tramo sobre el que se actúa se propone una tubería flexible flotante desde proa como tubería de descarga, dado que esta, debido al coste de movilizarla a lo largo de la costa de estudio, tiene un coste ampliamente inferior al caso de tubería sumergida apoyada sobre el fondo marino; aunque se deben evitar los fuertes oleajes y el tráfico marítimo, pues lo interfiere.

## **SEGUIMIENTO TÉCNICO DE LA EXTRACCIÓN DE ARENA**

Los objetivos que debe cumplir el programa de seguimiento técnico del dragado como expone Alguacil (2020), son los siguientes:

- Analizar el grado de ajuste entre el impacto teórico previsto generado por la obra y el real que se produce durante su ejecución, así como la detección de los problemas que puedan presentarse y la aplicación de las medidas adecuadas para solventarlos.
- Comprobar que los trabajos de dragado se realizan correctamente y en las condiciones especificadas en el proyecto correspondiente.
- Determinar la eficacia de las medidas de protección ambiental.

### 6.8.2 Cálculo estimativo de la producción y tiempo de dragado

A continuación, se realiza una estimación de la producción y el tiempo de dragado, influyentes directamente en el presupuesto del estudio.

Para ello, se plantea un cálculo de la producción de la maquinaria a un nivel más general, teniendo en cuenta el suelo tipo a dragar, los volúmenes de extracción y las distancias medias entre las zonas de trabajo.

La metodología para seguir para el cálculo de la producción de dragado es el método BBL (Bray, Bates y Land), el cual se utiliza para estimar los rendimientos de los equipos de dragado. Consiste en aplicar una serie de factores reductores que representan pérdidas de tiempo sobre la producción inicial teórica, obteniéndose así la producción real de dragado.

Se considera que la influencia de las interrupciones por tráficos marítimo e inclemencias meteorológicas es media-baja debido a la zona objeto de estudio. Los pasos a seguir se identifican del mismo modo en que Unay (2020) calculó de modo estimado la producción y tiempo de dragado durante la realización de un proyecto de regeneración de las playas de El Perelló, Pouet y Les Palmeres (Valencia):

1. Identificar la unidad básica de producción.
2. Modificar esta unidad considerando las condiciones del terreno y de la excavación o bombeo.
3. Identificar el ciclo de dragado pertinente.
4. Aplicar el ciclo de dragado a la unidad de producción modificada.
5. Tipos de producción.
6. Aplicar los factores de reducción adecuados.

Se consideran ciertas hipótesis de partida para determinar el ciclo de una draga de succión en marcha:

Parámetro	Orden de magnitud
Concentración de sólidos en succión	20-30% del volumen absorbido
Concentración final de sólidos en cántara	85% del volumen total
Tiempo de descarga	10 min (por fondo); 60 min (tubería)
Distancia de transporte	Variable según tramo
Velocidad de succión	6 m/s

Tabla 11. Hipótesis de partida para determinar el ciclo de la draga. Fuente: García y Moreno (2010).

### Identificación de la unidad básica de producción ( $U_b$ )

La unidad básica de producción es única para cada draga. Depende de la potencia disponible para realizar el trabajo y del tamaño de los componentes de la excavación. En el caso de las dragas de succión en marcha coincide con la capacidad de la cántara.

### Modificación de la unidad básica de producción ( $U_m$ )

La unidad básica de producción se modifica al tener en cuenta las condiciones del terreno y de la excavación o bombeo. La unidad básica de producción modificada representa el volumen de material in situ que puede almacenar la draga.

$$U_m = \frac{H}{B} \quad (22)$$

Siendo:

$U_m$             Unidad básica de producción modificada ( $m^3$ )

$H$                 Capacidad de la cántara de la draga ( $m^3$ )

$B$                 Factor de esponjamiento

El volumen de material puede variar a lo largo de los trabajos de dragado, transporte y vertido. El factor de esponjamiento representa la relación entre el volumen que ocupa el material in situ y el volumen que ocupa el mismo en la cántara, siendo mayor en el último caso debido al cambio de densidad del material por la formación de huecos al ser dragado. En la siguiente tabla, se muestran factores de esponjamiento en diferentes terrenos.



Tipo de terreno	Factor de esponjamiento (B)
Roca dura	1,50-2,00
Roca de dureza media	1,40-1,80
Roca blanda	1,25-1,40
Gravas fuertemente compactadas	1,35
Gravas sueltas	1,10
Arena fuertemente compactada	1,25-1,35
Arena medianamente blanda a dura	1,15-1,25
Arena blanda	1,05-1,15
Sedimentos depositados libremente	1,00-1,10
Sedimentos consolidados	1,10-1,40
Arcillas muy duras	1,15-1,25
Arcillas medianamente blandas a duras	1,10-1,15
Arcillas blandas	1,00-1,10
Mezcla de gravas, arenas y arcillas	1,15-1,35

Tabla 12. Factor de esponjamiento según el tipo de terreno. Fuente: Bray et al. (1996).

El tipo de material presente en el yacimiento propuesto es arena blanda, se considerará un factor de esponjamiento de 1,10.

### Identificación del ciclo de dragado pertinente

Las operaciones que considerar durante el ciclo de trabajo de una draga de succión en marcha son la siguientes:

- Carga del material (succión).
- Giro de la draga al terminar la pasada de una zona.
- Navegación al punto de vertido y vuelta a la zona de dragado.
- Descarga del material dragado.

#### Operación de carga

El caudal de succión para el tipo de draga considerado se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \text{Sección del tubo} \times \text{Velocidad de succión} \quad (23)$$

Es importante conocer el número de tubos de succión. En las hipótesis de partida se ha considerado que los sólidos absorbidos en 1 hora son aproximadamente el 25% del volumen. A partir de este dato, se puede obtener el tiempo de carga invertido para alcanzar el 85% de sólidos en la cantara

### Giro de la draga

Las expresiones para determinar el número de giros necesarios y el tiempo para realizarlos son las siguientes:

$$N^{\circ} \text{giros} = \frac{3,91 * t_l}{l} \quad (24)$$

$$T_g = \frac{3,91 * t_l * t_t}{l} \quad (25)$$

Donde:

- $t_l$  Tiempo invertido en la operación de carga (h)
- $t_t$  Tiempo invertido en girar la draga al final de cada pasada (h)
- $l$  Longitud de la zona de dragado (km)

Las velocidades consideradas de forma estándar son:

- Velocidad de desplazamiento durante el llenado = 2 nudos  $\approx 3,7 \text{ km/h}$ .
- Tiempo de giro = 4 min = 0,066 horas.

### Navegación y descarga del material dragado

El tiempo de navegación hasta el punto de vertido y de vuelta a la zona de dragado se estima mediante la expresión:

$$T_{nav} = \frac{1,02 * g}{V_g} \quad (26)$$

Siendo:

- $T_{nav}$  Tiempo de navegación (h)
- $g$  Distancia hasta el punto de vertido (km)
- $V_g$  Velocidad de navegación de la draga cargada (nudos)

En esta formulación, sin embargo, no tiene en cuenta que la vuelta a la zona de extracción de arenas se realiza más rápido al ir la cántara vacía. Sin embargo, esto se compensa con el hecho de que tampoco se consideran períodos de aceleración y deceleración de la draga al comienzo y final del desplazamiento.

El tiempo de descarga del material depende del método utilizado para ello. La descarga por fondo tan solo necesita unos minutos, pero si se realiza por tubería, el tiempo puede incrementarse hasta valores de aproximadamente una hora. El tiempo total no productivo corresponde a la suma de los tiempos de giro, navegación y descarga:

$$T_{cnp} = T_g + T_{nav} + T_d = \frac{3,91 \cdot t_l \cdot t_t}{l} + \frac{1,02 \cdot g}{V_g} + T_d \quad (27)$$

Donde:

- $T_{cnp}$  Tiempo no productivo
- $t_l$  Tiempo invertido en la operación de carga (h)
- $t_t$  Tiempo invertido en girar la draga al final de cada pasada (h)
- $l$  Longitud de la zona de dragado (km)
- $g$  Distancia hasta el punto de vertido (km)
- $V_g$  Velocidad de navegación de la draga cargada (nudos)
- $T_d$  Tiempo de descarga del material (h)

Para determinar el factor de llenado de la cántara ( $f_e$ ) se utiliza la curva de carga de draga de succión en marcha. A partir del mismo, se puede calcular la carga total de la draga.

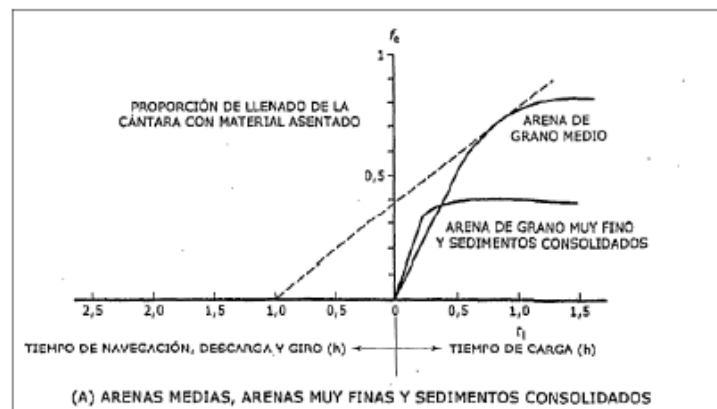


Figura 49. Valor del parámetro  $f_e$ . Fuente: Bray et al. (1996)

$$C_T = \frac{H * f_e}{B} \quad (28)$$

Siendo

$C_T$	Carga total de la draga ( $m^3$ )
$H$	Capacidad de la cántara de la draga ( $m^3$ )
$B$	Factor de esponjamiento
$F_e$	Factor de llenado de la cántara

Con todo ello, el tiempo total invertido en el ciclo de trabajo de la draga ( $T_{tc}$ ) y la producción máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) son los siguientes:

$$T_{tc}(h) = t_l + T_{cnp} \quad (29)$$

$$P_{m\acute{a}x}\left(\frac{m^3}{h}\right) = \frac{C_T}{T_{tc}} \quad (30)$$

Al valor de la producción máxima se le deben aplicar los factores de reducción correspondientes que permitan obtener la producción real (P) de la draga. Estos factores son el factor de retraso, factor de operación y factor de fallo mecánico.

#### Factor de retraso ( $f_d$ )

Se aplica si los trabajos se interrumpen por causas meteorológicas o de tráfico marítimo. Se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$f_d = f_t * f_w = \frac{TTD - TPT}{TTD} * \frac{NTDA}{NTD} \quad (31)$$

Donde:

TTD	Tiempo total de trabajo disponible
TPT	Tiempo perdido debido al tráfico marítimo y otras contingencias durante las horas de trabajo
NTDA	Número total de horas en los que las condiciones atmosféricas permiten trabajar
NTD	Número total de horas de trabajo

### Factor de operación ( $f_o$ )

Representa una disminución en el rendimiento del personal, ya que no siempre se trabaja a máximo rendimiento ni se es capaz de anticipar todos los imprevistos que se puedan presentar.

La siguiente tabla muestra el factor sugerido en función de la capacidad de dotación y de dirección. Es necesario multiplicar los mismos valores por 0,95 cuando se trata de condiciones climáticas favorables y por 0,90 si las condiciones son muy extremas.

Calificación de la supervisión	Calificación de la tripulación				
	Muy buena	Buena	Mediana	Mediocre	Pobre
Muy buena	0,90	0,84	0,78	0,73	0,67
Buena	0,88	0,82	0,77	0,71	0,65
Mediana	0,86	0,80	0,75	0,69	0,64
Mediocre	0,84	0,79	0,73	0,67	0,62
Pobre	0,82	0,77	0,71	0,65	0,60

Tabla 13. Calificación del personal. Fuente: Bray et al. (1996)

### Factor de fallo mecánico ( $f_b$ )

Hace referencia a la antigüedad de la draga. Los primeros cinco años no se tiene en cuenta, pero posteriormente se reduce 1% por cada año transcurrido hasta que finalizados los 20 años se considera  $f_b=0,85$ . Una vez conocidos todos los parámetros de reducción, se puede obtener la producción real del equipo de dragado aplicando la siguiente ecuación:

$$P = P_{m\acute{a}x} * f_d * f_o * f_b \quad (32)$$

Siendo

P Producción real ( $m^3/h$ )

$P_{m\acute{a}x}$  Producción máxima ( $m^3/h$ )

$f_d$  Factor de retraso

$f_o$  Factor de operación

$f_b$  Factor de fallo mecánico

## APLICACIÓN AL TRAMO PLAYA DE PINEDO – GOLA DEL PUJOL

El yacimiento de material sedimentario se encuentra a unos 10 km de la costa, frente a Cullera, y los puntos de vertido se localizan entre la playa de Pinedo, y la Gola del Pujol.

Por ello, se estima una distancia media a zona de vertido, la cual se muestra a continuación junto al volumen de sedimentos requerido según el incremento del nivel del mar y la futura erosión de la costa debido al transporte de sedimentos.

Se estima una distancia media de vertido de 18 kilómetros desde el yacimiento de Cullera, hasta la zona de vertido, tomando un punto medio del subtramo.

En cuanto al cálculo del volumen de extracción, el yacimiento dispone de arenas gruesas y medias aptas para regeneración de playas mezcladas con material fino, por lo que se debe extraer un volumen de sedimentos mayor al necesario teniendo en cuenta esta proporción de finos. Su valor se establece en un 22%.

De forma resumida, los datos de partida son:

Tramo	Volumen requerido (m <sup>3</sup> )	Volumen de extracción (m <sup>3</sup> )	Distancia media a zona de vertido (km)
Puerto de Valencia-Cabo de Cullera	4.400.000	5.610.000	18

Tabla 14. Volumen requerido y distancia media del tramo. Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo estimado del tiempo de dragado se toma como ejemplo un equipo de draga de succión en marcha tipo Jumbo cuyas características son las siguientes:

Parámetro	Orden de magnitud
Eslora total (m)	223
Manga (m)	41
Capacidad de la cántara (m <sup>3</sup> )	46.000
Diámetro tubería succión (mm)	1.300
Máxima profundidad de dragado (m)	155
Velocidad de succión (m/min)	8
Velocidad de navegación con la cántara llena (nudos)	18

Tabla 15. Características de una draga de succión en marcha tipo Jumbo-Cristóbal Colón (2008). Fuente: Escalante (2019).

Siguiendo la metodología propuesta por Unay (2020), el volumen de extracción necesario para la regeneración de las playas que comprende este tramo es de  $5.610.000 \text{ m}^3$ . La distancia media a los puntos de vertido es de 18 km. Aplicando la formulación descrita en el subapartado anterior se obtienen todos los parámetros necesarios para determinar el tiempo necesario para llevar a cabo el trabajo de dragado.

### **Unidad básica de producción ( $U_b$ )**

Para las dragas tipo Jumbo, la unidad básica de producción coincide con la capacidad de la cántara:

$$U_b = H = 46.000 \text{ m}^3$$

### **Unidad básica de producción modificada ( $U_m$ )**

Se considera un factor de esponjamiento de 1,1 previamente descrito.

$$U_m = \frac{H}{B} = \frac{46.000}{1,1} = 41.818,18 \text{ m}^3$$

### **Tiempo de carga ( $T_{carga}$ )**

El tiempo de carga aproximado es  $T_{carga} = t_l = 4 \text{ horas}$ .

### **Tiempo de giro ( $T_g$ )**

El yacimiento de material sedimentario tiene un área lo suficientemente amplia que permite que la draga pueda realizar los giros manteniendo la succión, por lo que no hay pérdida de tiempo en esta maniobra.

### **Tiempo de navegación ( $T_{nav}$ )**

Suponiendo una velocidad de navegación para la draga cargada de 10 nudos, debido a la proximidad a la línea de costa, se tiene:

$$T_{nav} = \frac{1,02 * g}{V_g} = \frac{1,02 * 18}{10} = 1,836 \text{ horas}$$

### **Tiempo de descarga el material dragado ( $T_d$ )**

Para la regeneración de playas (relleno) suele utilizarse la descarga por tubería, cuyo ritmo de trabajo es de aproximadamente 1 hora por descarga.



### Tiempo no productivo ( $T_{cnp}$ )

$$T_{cnp} = T_g + T_{nav} + T_d = 0 + 1,84 + 1 = 2,84 \text{ horas}$$

### Carga total de la draga ( $C_T$ )

Se considera un factor de llenado de la cántara  $f_e=0,8$ .

$$C_T = \frac{H * f_e}{B} = \frac{46.000 * 0,8}{1,1} = 33.454,55 \text{ m}^3$$

### Tiempo de ciclo de trabajo de la draga ( $T_{tc}$ )

$$T_{tc}(h) = t_l + T_{cnp} = 4 + 2,84 = 6,84 \text{ horas}$$

### Producción máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ )

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{C_T}{T_{tc}} = \frac{33.454,55}{6,84} = 4891,01 \text{ m}^3/h$$

### Producción real ( $P$ )

Para el cálculo de la producción real se supone un trabajo continuo de la draga, es decir, 24 horas durante los 7 días de la semana, lo que supone un total de 168 horas de trabajo semanales. Respecto a los factores de reducción, se considera que la pérdida de tiempo debida al tráfico marítimo u otras contingencias es de 1 hora al día y de 1 hora también si la interrupción es causada por inclemencias meteorológicas o por las condiciones del mar. Así, se obtiene que el factor de retraso ( $f_d$ ) es:

$$f_d = f_t * f_w = \frac{TTD - TPT}{TTD} * \frac{NTDA}{NTD} = \frac{24 - 1}{24} * \frac{23}{24} = 0,958 * 0,958 = 0,918$$

Para el factor de operación ( $f_o$ ), se entiende que tanto el equipo de dirección como la dotación de personal desempeñan su labor de forma eficiente, por lo que  $f_o=0,9$ . El factor de fallo mecánico ( $f_b$ ) considerado es de 0,91. La producción real de la draga de succión en marcha tipo Jumbo es la siguiente:

$$P = P_{m\acute{a}x} * f_d * f_o * f_b = 4891,01 * 0,918 * 0,9 * 0,91 = 3677,27 \text{ m}^3/h$$

La producción en un ciclo es:

$$P_{ciclo} = P * T_{tc} = 3677,27 * 6,84 = 25152,53 \text{ m}^3/ciclo$$

En una semana, el número de ciclos de la draga es:

$$N^{\circ} \text{ciclos semanales} = \frac{\text{Horas de trabajo semanales}}{T_{tc}} = \frac{168}{6,84} = 24,56 = 25 \text{ ciclos}$$

### **Tiempo estimado de material dragado a playa (T)**

El volumen de extracción necesario para la alimentación artificial del tramo objeto de estudio es de 5.610.000 m<sup>3</sup> y, por tanto, el tiempo total de dragado:

$$T = \frac{\text{Volumen de arena necesario}}{N^{\circ} \text{ciclos semanales} * P_{\text{ciclo}}} = \frac{5.610.000}{25 * 25152,53} = \mathbf{8,92 \text{ semanas}}$$

$\approx 2 \text{ meses} \approx 2.5 \text{ meses}$

Se estima un tiempo total de operación de dragado de 2.5 meses del lado de la seguridad.

### **6.8.3 Impacto ambiental de la actuación propuesta**

Parte de la información referente a los aspectos ambientales de la actuación se obtiene del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto «Extracción de arena en aguas profundas de Valencia para alimentación de playas» (García y Moreno, 2010), que cuenta con una Declaración de Impacto Ambiental (2013).

Para este tipo de actuaciones también hay que remitirse a las Directrices para la gestión ambiental de las extracciones marinas para la obtención de arenas establecidas por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (CEDEX, 2010).

La sostenibilidad de las actuaciones de regeneración propuestas debe garantizarse a lo largo de las distintas fases de ejecución.

Existe una multitud de elementos ambientales significativos, los cuales deben estudiarse previo a la ejecución del proyecto, tales como la hidrodinámica y calidad del agua, sedimentos, fauna, espacios naturales protegidos, socioeconomía o patrimonio cultural.

En cuanto a los condicionantes ambientales, el principal, es que la puesta en suspensión del material fino durante el dragado provoca un aumento de la turbidez de las aguas, la cual según se refleja en la DIA tendrá un efecto temporal, aunque se debe estudiar su dispersión y transporte en suspensión durante los trabajos de vertido.

La retirada de material del fondo marino origina cambios en la morfología y litología de este. Las operaciones de dragado modificarán la batimetría y generarán superficies irregulares que se suavizarán progresivamente. Puesto que el banco de arena se encuentra más allá de la zona de transporte de sedimentos, no se contempla la reposición natural del mismo.

Con base en el tipo de actuación a realizar, las comunidades más afectadas serán las ligadas al fondo marino (bentónicas) y, en menor medida, las especies demersales. En comunidades bentónicas, de manera directa, la operación de dragado supondrá la desaparición de individuos debido al movimiento del cabezal de la draga; indirectamente, la sedimentación del material fino puesto en suspensión puede causar el enterramiento de los organismos, aunque al ser paulatino no afectará a las especies con capacidad de movimiento (Alguacil, 2020).

Respecto a la navegación de la draga de succión en marcha durante los trabajos de regeneración, Capitanía Marítima de Valencia informa que “no existe inconveniente alguno en autorizar el dragado, siempre y cuando se le indique el nombre y la matrícula de la draga que realiza el trabajo, se señalice la misma y se dispongan los medios de contención adecuados para evitar los vertidos a la mar.” El vertido marítimo debe ser autorizado según indica el artículo 131.2 de la Ley 48/2003 de 26 de noviembre, de manera que, en fase de proyecto, esta aprobación deberá ser tramitada.

En cuanto a los efectos del cambio climático, también existe normativa que debe acatarse durante el desarrollo de las propuestas de solución impuesta por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), sin embargo, el presente trabajo nace de un estudio del cambio climático por lo que se considera correcto.

Respecto a la valoración de impactos, tras el análisis de los condicionantes ambientales identificados en esta actuación, se considera que los impactos son moderados, no precisando de actuaciones de protección o medidas correctivas específicas.

## **MEDIDAS PREVENTIVAS**

Existen una serie de medidas que pueden ser propuestas para prevenir o minimizar el impacto que pueda causar sobre el medioambiente la ejecución de las actuaciones de regeneración propuestas, todas ellas regidas por la normativa correspondiente.

- Para mantener la calidad del aire y del agua se evitarán vertidos, emisiones y la generación innecesaria de ruido.
- El sistema de dragado debe minimizar la resuspensión de finos siempre que la técnica lo permita con el fin de disminuir las afecciones debidas al aumento de turbidez.
- Se deben adoptar medidas para preservar la calidad del agua y las condiciones del fondo marino, ya que inciden directamente en la protección de la flora y fauna marinas.
- Para conservar el patrimonio cultural que pudiera aparecer, se notificará el comienzo de los trabajos a la autoridad competente y se realizará un control arqueológico en draga.
- En cuanto al impacto sobre la pesca, se propone la redacción de un programa de vigilancia ambiental que lleve a cabo el estudio periódico de los recursos pesqueros, evaluando la incidencia real de la actividad.

## **CONSIDERACIONES AMBIENTALES PARA LA REGENERACIÓN DE PLAYAS**

El correspondiente proyecto de regeneración que desarrolle la solución descrita en el presente trabajo deberá contar con un Estudio de Impacto Ambiental. La Dirección General de Costas en su documento de Directrices sobre actuaciones en playas establece que deben estudiarse:

- Los posibles efectos ambientales de la actuación aun cuando no sea exigible someterla al procedimiento de evaluación de impacto ambiental.
- Las medidas preventivas, correctoras y compensatorias que procedan.
- La posibilidad de compatibilizarla con una mejora de sus condiciones como hábitat.
- La calidad de las arenas si se requiere alimentación artificial.

Puesto que no es objeto de este estudio el análisis de incidencia ambiental se describe esquemáticamente lo que debería incluir su Estudio de Impacto Ambiental:

- Antecedentes, objeto y descripción del proyecto.
- Inventario ambiental:

Marco geográfico.

Clima.

Geología y morfología.

Hidrología.

Edafología.

Calidad atmosférica.

Calidad de las aguas.

Medio biótico

Flora y vegetación

Fauna

Paisaje

Espacios naturales protegidos

Patrimonio cultural y arqueológico

Cambio climático

Medio socioeconómico

- Identificación y valoración de impactos de las obras de regeneración sobre los elementos enumerados previamente.
- Medidas preventivas, correctoras y compensatorias sobre los impactos de cara al control de sus efectos sobre la zona de actuación.

#### 6.8.4 Conclusiones

El conjunto de actuaciones de dragado y regeneración de playas requiere una adecuada programación en el espacio y tiempo que permita reducir los costes de operación a la vez que maximizar los beneficios económicos, sociales y ambientales.

El tiempo total de dragado para la aportación de arena al tramo de costa correspondido entre el Puerto de Valencia hasta el Cabo de Cullera es de aproximadamente 2 meses y medio, además en el yacimiento de material sedimentario de Cullera se dispone de material suficiente para llevar a cabo esta regeneración.

Respecto a la solución de vertido del material, se busca la más adecuada que asegure un correcto funcionamiento de la dinámica litoral, de modo que se eviten los desequilibrios y daños futuros.

En la solución propuesta se han tenido en cuenta factores como la dirección de transporte sólido predominante o la evolución de la línea de costa entre otros, de modo que se asegura que en el año 2040 el tramo de costa situado al sur del Puerto de Valencia se encuentre en iguales o mejores condiciones que a día de hoy.

En el caso de actuaciones futuras, las cuales requieran de un volumen menor, se puede plantear un *bypass* con la playa de la Malvarrosa, la cual, y de manera contraria a las playas situadas al sur de Puerto de Valencia que se encuentran en estado de regresión, se encuentra en un continuo estado de acreción.

## 6.9 Estudio económico de la alimentación artificial

El coste de los trabajos propuestos para la alimentación artificial del tramo de costa situado al sur del Puerto de Valencia queda principalmente determinado por la draga de succión en marcha empleada, así como los trabajos de extendido en tierra.

En primer lugar, se muestra la estructura de costes de una draga de succión en marcha y como realizar el análisis económico de la extracción de arena.

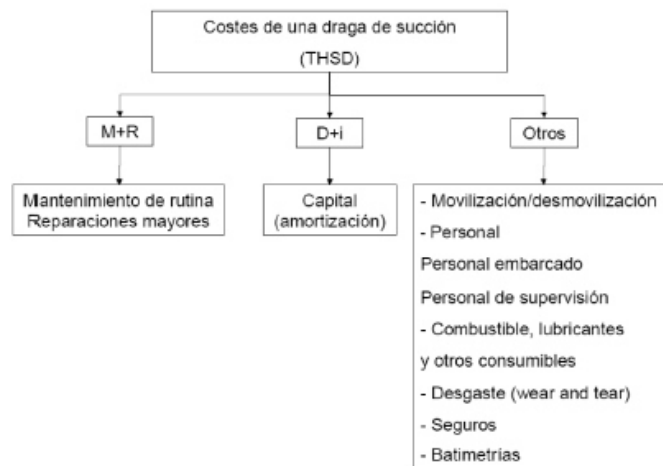


Figura 50. Costes de una draga de succión en marcha. Fuente: García y Moreno (2010)

Toda la información descriptiva del análisis de la extracción de arena mediante la draga de succión en marcha tipo Jumbo es extraída de Raúl Escalante, 2019. A continuación, se resume el proceso seguido.

### **COSTES DE CAPITAL**

Generalmente las operaciones de dragado tienen un alto coste, incrementándose proporcionalmente a la magnitud de la draga y cantidad de material a dragar. En el presente trabajo se emplea una draga de gran magnitud como lo son las dragas de succión en marcha tipo Jumbo.

La amortización del capital invertido es uno de los conceptos más importantes del coste total de la operación. Este valor incluye la amortización inicial y los intereses compensatorios de una inversión equivalente (Escalante, 2020). El período de amortización de una draga de succión en marcha es de 30 años.

La cuota de capital o coste anual amortizable (CA) se calcula mediante la siguiente expresión:



$$CA = (V_0 - V_r) * f_r + V_r * i \quad (33)$$

Siendo:

CA	Coste anual amortizable
V <sub>0</sub>	Capital inicial/8
V <sub>r</sub>	Valor residual (5-20 %)
i	Tasa de interés
f <sub>r</sub>	Factor de recuperación del capital para una vida útil (n) y tasa de interés (i) determinadas

$$f_r = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}} \quad (34)$$

## MOVILIZACION/DESMOVILIZACIÓN

La movilización de equipos, personal y materiales necesarios para ejecutar una obra de dragado es una tarea específica de cada obra (Escalante, 2020). En caso de obras de gran magnitud como la del presente estudio, se ha de tener en cuenta que la movilización de los equipos necesarios deba realizarse desde largas distancias dado el bajo número de existencias y su uso a nivel internacional.

El coste de movilización comprende los costes directos de las operaciones necesarias para ello, incluyendo el coste de capital de los equipos en horas libres, seguros, costes de supervisión y los correspondientes a gastos generales. Al terminar los trabajos de dragado se desmovilizan todos los equipos y el personal. El coste se calcula de manera análoga al de movilización.

## MANTENIMIENTO DE RUTINA

El mantenimiento de rutina hace referencia a las tareas de mantenimiento y a las reparaciones diarias que debe llevar a cabo el personal de a bordo como el jefe de maquinistas, electricistas, etc. Su coste depende de las horas de funcionamiento.

Puede realizarse una primera estimación del coste diario multiplicando el valor del equipo por un coeficiente K<sub>1</sub> que es una función del tipo de este. En este caso, al tratarse de una draga de succión en marcha, se tiene K<sub>1</sub>=0,000135.

Tipo de equipo	$K_1$
<b>Draga de succión en marcha</b>	0,000135
Draga de succión con cortador	0,000140
Draga tipo retroexcavadora	0,000140
Draga de cuchara	0,000130
Barcaza autopropulsada	0,000130
Barcaza no autopropulsada	0,000025
Remolcador	0,000145

Tabla 16. Mantenimiento de rutina - Coste por día. Fuente: Bray et al. (1996)

Para reparaciones mayores, puede realizarse una primera estimación del coste diario multiplicando el valor del equipo por un coeficiente  $K_2$  que es una función del tipo de este. Al tratarse de una draga de succión en marcha, se tiene  $K_2=0,000275$ .

Tipo de equipo	$K_2$
<b>Draga de succión en marcha</b>	0,000275
Draga de succión con cortador	0,000300
Draga tipo retroexcavadora	0,000300
Draga de cuchara	0,000250
Barcaza autopropulsada	0,000260
Barcaza no autopropulsada	0,000050
Remolcador	0,000300

Tabla 17. Reparaciones mayores - Coste por día. Fuente: Bray et al. (1996)

## GASTOS GENERALES Y BENEFICIO INDUSTRIAL

El beneficio industrial es el margen de ganancias que se lleva la empresa que ejecuta las obras. El porcentaje de gastos generales varía entre un 13-17% y el beneficio industrial suele fijarse en un 6%, aplicándose ambos sobre el presupuesto de ejecución material (PEM).

## ESTIMACIÓN DE COSTE ECONÓMICO DE LA EXTRACCIÓN DE ARENA

Con lo expuesto anteriormente, se establece un precio medio de dragado, transporte y vertido del material de 10 €/m<sup>3</sup>, en base al proyecto realizado por Alguacil (2020) y similares.

Sin embargo, en el momento actual, junio del año 2022, los precios son superiores respecto a 2020, por la situación de inflación y crisis energética que se está sufriendo, por tanto, se estima una subida del 20% del precio por m<sup>3</sup>, de modo que, se establece un precio medio de dragado, transporte y vertido del material de **12 €/m<sup>3</sup>**.

En la tabla 18, se muestra el volumen requerido, así como el coste económico semanal y total de la actuación.

Tramo	Volumen de extracción (m <sup>3</sup> )	Importe de la extracción de arena (€/m <sup>3</sup> )	Coste económico semanal (€)	Coste económico total (€)
Puerto de Valencia – Cabo de Cullera	5.610.000	12	7.538.630	67.320.000

**Tabla 18. Coste económico total de la actuación. Fuente: elaboración propia.**

La estimación del coste económico total para extraer 5.610.000 millones de m<sup>3</sup> de arena del yacimiento de material sedimentario de Cullera y aportarla para que en un período de 20 años el tramo de costa objeto de estudio, con una longitud total de 27 kilómetros aproximadamente, se encuentre en la situación actual, anticipándose a las consecuencias del cambio climático es de **67.320.000** euros (€).

## 7. Conclusiones

En el presente trabajo de final de grado, se ha desarrollado una metodología que permite evaluar las tendencias mediante el análisis de series históricas de la temperatura y del transporte sólido litoral. Del mismo modo, esta metodología es completamente extrapolable a otras variables que afectan al clima marítimo como la potencia del oleaje.

El futuro y la situación en que nuestro planeta se encontrará respecto al cambio climático en las siguientes décadas no es certera, ni siquiera los principales organismos climáticos como el IPCC son capaces de asegurarlo, es por ello por lo que resulta de gran importancia plantear distintos escenarios y anticiparse a los futuros daños que se producirán.

En el presente documento, se realiza una propuesta de actuación anticipándose a la situación climática del año 2040. En lugar de esperar a regenerar los daños producidos sobre la línea de costa, resulta más eficiente anticiparse a ellos.

Se trata de una de las primeras actuaciones sobre la costa española y el litoral valenciano, que además de anticipar el retroceso sobre la línea de costa provocado por la subida del nivel del mar, anticipa la cantidad de sedimentos que serán transportados a lo largo del tramo de costa objeto de estudio durante las próximas décadas.

Además, se trata de una metodología extrapolable a cualquier tramo de costa, y a cualquier año en el horizonte, por lo que la utilidad de esta es muy potente.

Las playas caracterizadas en el presente documento, en especial, las Playas de Pinedo o del Saler, han sufrido grandes consecuencias fruto de la construcción del Puerto de Valencia. Es más, desde hace aproximadamente una década, se encuentran pendientes de regeneración, a la espera de la final aprobación del respectivo proyecto.

Este proyecto de regeneración pendiente de aprobación, consistente en la recuperación de la línea de costa en base a como se encontraba hace unos años, quizá se trate de la solución más adecuada en el corto plazo, sin embargo, el Puerto de Valencia seguirá en el mismo emplazamiento durante los próximos siglos, y los daños sobre la línea de costa asociados a este, junto a los esperados debido al cambio climático, además de la tendencia en disminución de aporte de sedimentos de fuentes fluviales, agravarán la situación actual.

Es por ello, que, en el presente estudio, se considera esencial anticiparse a estas futuras consecuencias, para una óptima actuación en el medio y largo plazo.

Al fin y al cabo, las playas conformar una parte importante tanto de los ecosistemas terrestre como de los ecosistemas marinos.

Por un lado, alberga una enorme diversidad de seres vivos, entre los que destacan peces, algas y moluscos.

Por otro lado, alberga gran cantidad de actividades que hacen de las playas elementos muy valiosos a nivel medioambiental, social y económico. Gran parte del PIB de la Comunidad Valenciana, así como nacional, es generado en las mismas y en sus zonas de influencias.

Es por ello por lo que se deben recuperar y preservar de manera sostenible, es decir, permitiendo la conservación y progresión en el presente, pero sin comprometer a las generaciones futuras.

Como última reflexión por parte del autor, el ser consciente de la situación actual en la que nos encontramos, así como de la grave situación en que se puede encontrar la sociedad en unos años, es lo que ha motivado a la realización del presente estudio, en el que se ha trabajado de manera conjunta con la naturaleza, en lugar de evitarla.

Eduardo Ortuño Moreno



Valencia, 15 de junio de 2022

## 8. Referencias

- AEMET y OECC. (2021). *Cambio Climático: Bases Físicas*. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales/tematicos/Cclimatico/informe\\_ipcc.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales/tematicos/Cclimatico/informe_ipcc.aspx) (Consultado: 10 noviembre de 2021).
- Brunet, M., Aguilar, E., Saladie, O., Sigró, J. y López, D. (1999). “Variaciones y tendencias contemporáneas de la temperatura máxima, mínima y amplitud térmica diaria en el NE de España”. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9271> (Consultado: 7 enero de 2022).
- Alarcón, P. y Brandt, A. (2021). Resumen en español “Summary por Policymakers IPCC”. Disponible en: [https://grupovial.cl/wp-content/uploads/2021/08/Resumen-en-espanol\\_Summary-for-Policymakers-IPCC.pdf](https://grupovial.cl/wp-content/uploads/2021/08/Resumen-en-espanol_Summary-for-Policymakers-IPCC.pdf) (Consultado: 1 marzo de 2022).
- Alguacil Jiménez, Á. (2020). *Estudio de la restitución del flujo sedimentario fluvial y litoral de la costa valenciana entre el Delta del Ebro y el Puerto de Denia*. Trabajo de fin de máster. Univesitat Politècnica de València. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/158768>
- Aragonés, L., Pagán, J. I., López, I., Navarro-González, F. J. y Villacampa, Y. (2019). “Galerkin's formulation of the finite elements method to obtain the depth of closure. Science of The Total Environment”, *The Science of the total environment*, 660, pp. 1256–1263. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.017> (Consultado: 1 abril de 2022).
- Aragonés, L., Pagán, J. I., López, I. y Serra, J. C. (2018). “Depth of closure: New calculation method based on sediment data”. *International Journal of Sediment Research*, 33(2), pp. 198–207. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.12.001> (Consultado: 1 abril de 2022).
- Aragonés, L., Pagán, J. I., López, M. P. y Serra, J. C. (2019). “Cross-shore sediment transport quantification on depth of closure calculation from profile surveys”. *Coastal Engineering*, 151, pp. 64–77. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.002> (Consultado: 1 abril de 2022).
- Austria, P. M., Gómez, C. P. y Escobar, J. E. T. (2014). “Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México”, *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), pp. 135-149. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7357484> (Consultado: 10 noviembre de 2021).
- Boned Pérez, M. (2006). “La historia del clima”. Instituto Nacional de Meteorología. Disponible en: <https://www.tiempo.com/ram/2424/la-historia-del-clima/> (Consultado: 5 mayo de 2022).
- Bray, R., Bates, A. and Land, J. (1996). *Dredging: A Handbook for Engineers*.
- Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007). “Efecto invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una perspectiva desde las Ciencias de la Tierra”. En *Revista Digital Universitaria*. 8(10). Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm> (Consultado: 10 noviembre de 2021)

- Cañada, M.R., Galán, E., Fernández, F. y Cervera, B. (2001). “Análisis de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales en la meseta sur española durante el siglo XX”. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9195> (Consultado: 7 enero de 2022).
- Carrillo González, C.J. (2003). “Fundamentos del análisis de Fourier”. Disponible en: [http://grupo\\_ene.webs.uvigo.es/wordpress/publicaciones/Apuntes\\_Fourier.pdf](http://grupo_ene.webs.uvigo.es/wordpress/publicaciones/Apuntes_Fourier.pdf) (Consultado: 1 marzo de 2022).
- Castellano Albert, A. M. (2020). *Estudio del clima marítimo valenciano y su evolución a largo plazo considerando diversos escenarios de cambio climático*. Trabajo de fin de máster. Univesitat Politècnica de València. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/160741>
- CEDEX, (2015). *Estudio de la Dinámica Litoral, Defensa y Propuesta de mejora en las playas con problemas erosivos, considerando los efectos del cambio climático: Estrategia de actuación en la costa sur de Valencia*. Informe Final, 22-414-5-002. Madrid, España. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategiaactuacionvalenciafinalmemoriared1b\\_tcm30-163219.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategiaactuacionvalenciafinalmemoriared1b_tcm30-163219.pdf) (Consultado: 1 abril de 2022).
- CEDEX, (2017). *Estudio de la Dinámica Litoral, Defensa y Propuesta de mejora en las playas con problemas erosivos, considerando los efectos del cambio climático: estrategia de actuación en la costa de Granada*. Informe Final, 22-414-5-006. Madrid, España. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategia-proteccion-granada\\_tcm30-422730.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategia-proteccion-granada_tcm30-422730.pdf) (Consultado: 1 abril de 2022).
- Codron, J.C.G., Asociación Española de Climatología. Congreso y Universidad de Cantabria. (2004). “El clima: entre el mar y la montaña”, IV Congreso de la Asociación Española de Climatología. Santander, 2004: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria. pp. 51-62. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/8951> (Consultado: 10 de enero de 2022).
- Costa de Valencia. (2021). En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 3 de julio. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Costa\\_de\\_Valencia](https://es.wikipedia.org/wiki/Costa_de_Valencia) (Consultado: 5 mayo de 2022).
- Crain, C.M., Halpern, B.S., Beck, M.W. y Kappel, C.V. (2009) “Understanding and managing human threats to the coastal marine environment”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162(1), pp. 39-62. Disponible en: doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04496x (Consultado: 5 mayo de 2022).
- De Esteban Chapapría, V. (2020). Apuntes de la asignatura: Obras Marítimas. Universidad Politécnica de Valencia.
- De la Peña Olivas, J.M. (2007). *Guía técnica de estudios litorales: Manual de costas*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- De la Peña Olivas, J.M. y Sánchez González, J.F. (2018). “Respuesta de la costa a las variaciones del nivel del mar: efecto sobre las playas en España”. Disponible en:



<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2355>

(Consultado: 5 mayo de 2022)

- Escalante, R. (2019). “Consideraciones generales de dragado”. Ingeniería de dragado. Disponible en: [http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias\\_Navegables/ingenieria\\_dragado/DRA\\_T1.pdf](http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias_Navegables/ingenieria_dragado/DRA_T1.pdf) (Consultado: 5 de mayo de 2022)
- Escalante, R. (2019). “Costes de las obras de dragado”. Ingeniería de dragado. Disponible en: [http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias\\_Navegables/ingenieria\\_dragado/DRA\\_T15.pdf](http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias_Navegables/ingenieria_dragado/DRA_T15.pdf) (Consultado: 5 mayo de 2022)
- Escalante, R. (2019). “Draga de succión por arrastre”. Ingeniería de dragado. Disponible en: [http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias\\_Navegables/ingenieria\\_dragado/DRA\\_T9.pdf](http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias_Navegables/ingenieria_dragado/DRA_T9.pdf) (Consultado: 5 mayo de 2022).
- Escalante, R. (2019). “Draga de succión por arrastre. Cálculo de producción”. Ingeniería de dragado. Disponible en: [http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias\\_Navegables/ingenieria\\_dragado/DRA\\_T10.pdf](http://www.graduadosportuaria.com.ar/download/vias_Navegables/ingenieria_dragado/DRA_T10.pdf) (Consultado: 5 mayo de 2022).
- Ferrer Vives, F.X. (2018). *Tendencias y patrones espacio-temporales de las temperaturas y las precipitaciones en la isla de Mallorca*. Trabajo de fin de grado. Universitat de les Illes Balears.
- García, A., Moreno, L. (2010). *Proyecto de extracción de arena en aguas profundas de Valencia para alimentación de playas y Estudio de Impacto Ambiental*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Gil Flores, J. (2003). “Aplicación del método bootstrap al contraste de hipótesis en la investigación educativa”. *Revista de educación*, 336, pp. 251-265. Disponible en: [http://www.ince.mec.es/revistaeducacion/re336/re336\\_14.pdf](http://www.ince.mec.es/revistaeducacion/re336/re336_14.pdf) (Consultado: 1 marzo de 2022).
- González, L. (2018). *Regresión lineal simple. Teoría*. Disponible en: <https://aprendeia.com/algoritmo-regresion-lineal-simple-machine-learning/> (Consultado: 1 mayo de 2022).
- González, M.E.P., Del Pilar García Rodríguez, M. y Asociación Española de Climatología. (2001). “Estudio de las bandas térmicas del ETM en la Comunidad de Madrid y alrededores”. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9195> (Consultado: 10 de enero de 2022).
- Hochet, A., Dodet, G., Arduin, F., Hemer, M. y Young, I. (2021). “Sea State Decadal Variability in the North Atlantic: A Review”. *Climate*, 9(12), 173. <https://doi.org/10.3390/cli9120173> (Consultado: 10 noviembre de 2021).
- IH Cantabria. (2014). *Cambio Climático en la Costa Española*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambioclimatico/publicaciones/publicaciones/201>

[4%20INFORME%20C3E%20final\\_tcm30-178459.pdf](#) (Consultado: 10 de noviembre de 2020).

IH Cantabria. (s.f.). Visor C3E. Disponible en: <https://c3e.ihcantabria.com/>. (Consultado: 1 febrero 2022).

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Disponible en: [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf).

IPCC. (2022). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponible en: [https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf).

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

Liao, T.F., Mooney, C.Z., Duval, R.D. y Eliason, S.R. (1995). "Bootstrapping: A Nonparametric Approach to Statistical Inference". *Contemporary Sociology*, 24(2), pp. 269. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/2076915> (Consultado: 1 marzo de 2022).

Liste, M., Méndez, F.J., Losada, I.J., Medina, J.R. y Olabarrieta, M. (2004). "Variaciones hiperanuales de parámetros medios de oleaje en el litoral mediterráneo español en los últimos cincuenta años: efectos sobre la costa". Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8951> (Consultado: 10 enero de 2022).

Losada, I., Izaguirre, C. y Diaz, P. (2014). "Cambio climático en la costa española". Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/2014%20INFORME%20C3E%20final\\_tcm30-178459.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/2014%20INFORME%20C3E%20final_tcm30-178459.pdf). (Consultado: 30 de abril 2022).

Martín Chivelet, J. (1999). *Cambios climáticos. Una aproximación al Sistema Tierra*. Ediciones Libertarias.

Martínez, P.F., Patiño, C. y Tamayo, J.E (2014). "Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México". Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7357484> (Consultado: 10 enero de 2022).

Medina, J.R., Gimenez, M. H. y Hudspeth, R. T. (1992). "Un simulador de clima marítimo", *Revista Digital del Cedex*, 82, pp. 134. Disponible en: <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/845> (Consultado: 1 febrero 2022).

Medina, J.R. y Serrano-Hidalgo, O. (2005). "Interpolation of time series of sea states variables using neural networks". En *Proceedings of the 29th International*

- Conference. World Scientific Publishing Company. Disponible en: [https://doi.org/10.1142/9789812701916\\_0078](https://doi.org/10.1142/9789812701916_0078) (Consultado: 1 febrero 2022).
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013). Declaración de impacto ambiental del proyecto “Extracción de arena en aguas profundas de Valencia para alimentación de playas (Valencia)”. BOE núm 237, 3-10-2013, Sec. III 81334-81357.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2008). *Directrices sobre actuaciones en playas*. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/publicaciones/directrices\\_sobre\\_playas\\_tc\\_m30-161257.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/costas/publicaciones/directrices_sobre_playas_tc_m30-161257.pdf). (Consultado: 4 mayo de 2022).
- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (s.f). Ecocartografía de Valencia. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccioncosta/ecocartografias/ecocartografia-valencia.aspx>.
- NASA POWER Data Access Viewer (s.f). Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. (Consultado: 11 noviembre de 2021).
- Olmos, S. R., Espinosa, C. G., Izquierdo, C. V., Zavala, A. T., y Cruz, F. J. G. (2011). “Cambio Climático Global a través del tiempo geológico”. Investigación Universitaria Multidisciplinaria: Revista de Investigación de la Universidad Simón Bolívar, 10, pp. 12. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4106698> (Consultado: 20 diciembre de 2021).
- Puertos.es. (s.f.). Puertos. es. Disponible en: <http://www.puertos.es/> (Consultado: diciembre de 2021).
- Raso Nadal, J. M., Vide, J. M. y Asociación Española de Climatología. (1999). “La Climatología española en los albores del siglo XXI”, Asociación Española de Climatología. Barcelona, España. Pp. 103-112. Disponible en: <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9271> (Consultado: 10 de enero de 2022).
- Snyder, C. W. (2010). “The value of paleoclimate research in our changing climate”. Climatic Change, 100(3-4), pp. 407–418. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9842-5> (Consultado: 10 enero de 2021).
- Stanislawska, K., Krawiec, K. y Kundzewicz, Z. W. (2012). “Modeling global temperature changes with genetic programming. Computers & Mathematics with Applications”, 64(12), pp. 3717–3728. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2012.02.049>. (Consultado: 10 diciembre de 2021).
- Unay, O. (2020). “Regeneración de las playas de El Perelló, Pouet, y Les Palmeres, TT.M Varios (Valencia)”. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/actuaciones-proteccion-costa/valencia/460358-perello-pouet-palmeres.aspx> (Consultado: 20 abril de 2022).

- Uriarte, A. (2003). *Historia del clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984. *Shore Protection Manual*. Vicksburg, MS: Department of the Army, US Army Corps of engineers.
- Van Oldenborgh, G. J., Doblas-Reyes, F. J., Wouters, B. y Hazeleger, W. (2012). “Decadal prediction skill in a multi-model ensemble”. *Climate Dynamics*, 38(7-8), pp. 1263–1280. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1313-4>. (Consultado: 10 diciembre de 2021).
- Vargas-Yáñez, M., Moya, F., García-Martínez, M.C., Tel, E., Zunino, P., Plaza, F., Salat, J., Pascual, J., López-Jurado y J.L., Serra, M. (2010). “Climate change in the Western Mediterranean Sea 1900–2008”. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.04.013>. (Consultado: 10 diciembre de 2021).
- Visor GVA. (s.f.). *Visor de Cartografía del Institut Cartogràfic Valencià*. Generalitat Valenciana. Disponible en: <https://visor.gva.es/visor/>. (Consultado: 4 mayo de 2022).
- Yepes, V. (2016). “Dragas de succión en marcha o de arrastre”. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/11/02/dragas-succion-en-marcha/>. (Consultado: 4 mayo de 2022).

## ANEXO 1. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

## DESCRIPCIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, conocidos como ODS, son 17 objetivos globales interconectados diseñados para formar parte de un plan para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos.

Es un plan propuesto por Naciones Unidas con el fin de dar continuidad al proyecto previo de Objetivos de Desarrollo del Milenio.

Cada objetivo está compuesto por unas metas que describen de manera sencilla los pasos a seguir para el cumplimiento de cada uno de los objetivos.

A continuación, se muestra una figura con los 17 objetivos de desarrollo sostenible:



Figura 51. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas.

Objetivos:

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y Bienestar.
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género
6. Agua limpia y Saneamiento
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo y crecimiento económico.

9. Industria, Innovación e Infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y Comunidades sostenibles.
12. Producción y Consumo responsables.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, Justicia e Instituciones sólidas.
17. Alianzas para lograr los Objetivos.

### RELACIÓN DEL TFG CON LOS ODS

En la siguiente tabla se relaciona de manera clara y entendible, los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible con el presente Trabajo Fin de Grado que tiene como título: “Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera (Valencia)”.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				X
ODS 3. Salud y bienestar			X	
ODS 4. Educación de calidad				X
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables			X	
ODS 13. Acción por el clima	X			
ODS 14. Vida submarina	X			
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres		X		
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos		X		

Tabla 19. Relación del TFG con los ODS.



## DESCRIPCIÓN DE LOS ODS CON UN ALTO NIVEL DE RELACIÓN

### ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico

El objetivo principal de este estudio es anticiparse a las consecuencias sobre la costa que tendrá el cambio climático, como la destrucción de la línea de costa. De manera contraria, la costa seguirá erosionándose y se pondrá fin a toda actividad que se desarrolla en línea de costa, más en una zona ampliamente turística como el litoral mediterráneo.

Por tanto, mediante el presente estudio, se asegura una línea de costa para las próximas décadas, de modo que se puedan seguir llevando actividades con total normalidad en la línea de costa y se siga potenciando el desarrollo y crecimiento económico.

Por otro lado, lleva a cabo esta actuación, generará empleos en lo referente a la duración de la propuesta de aplicación, tanto en las operaciones de dragado, como en la supervisión de estas, entre otras actividades.

### ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras

En el presente trabajo se propone una actuación sobre la costa de modo que, en lugar de regenerar daños causados, se anticipe a ellos, siendo de las primeras propuestas sobre la costa española que lo hace.

Para la elaboración de pronósticos de transporte sólido se ha recurrido a herramientas matemáticas y estadísticas para poder llevarlo a cabo, tratándose de soluciones innovadoras frente al clásico estudio del transporte de sedimentos.

### ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles

La adaptación de la costa situada al sur del Puerto de Valencia al cambio climático se realiza con el objetivo de garantizar un crecimiento sostenible del municipio de Valencia.

Durante muchas décadas, el desarrollo económico y de la población, ha llegado a convertirse en una solución insostenible, por lo que, de este modo, se puede volver a asegurar la sostenibilidad del litoral y la costa española.

### **ODS 13. Acción por el clima**

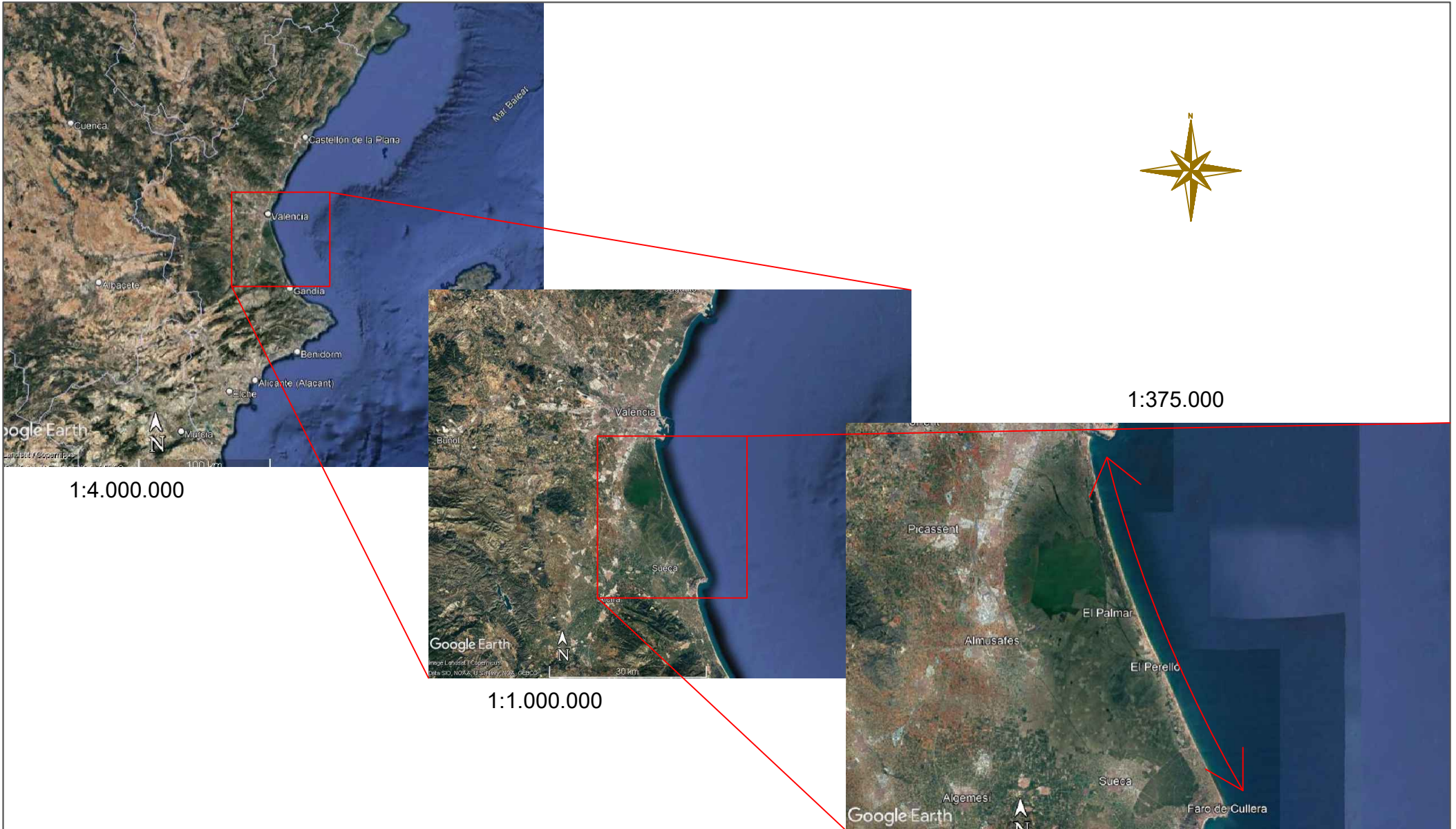
En el presente trabajo de final de grado, se ha realizado un amplio estudio del cambio climático, desde conceptos básicos hasta la elaboración de un sofisticado modelo de evaluación de tendencias de las principales variables climáticas.

El objetivo de este trabajo es adecuar la costa española a los futuros efectos del provocados sobre clima debido al cambio climático, sin embargo, resultaría de mayor importancia frenar la contaminación y emisiones de CO<sub>2</sub> así como otros gases nocivos.

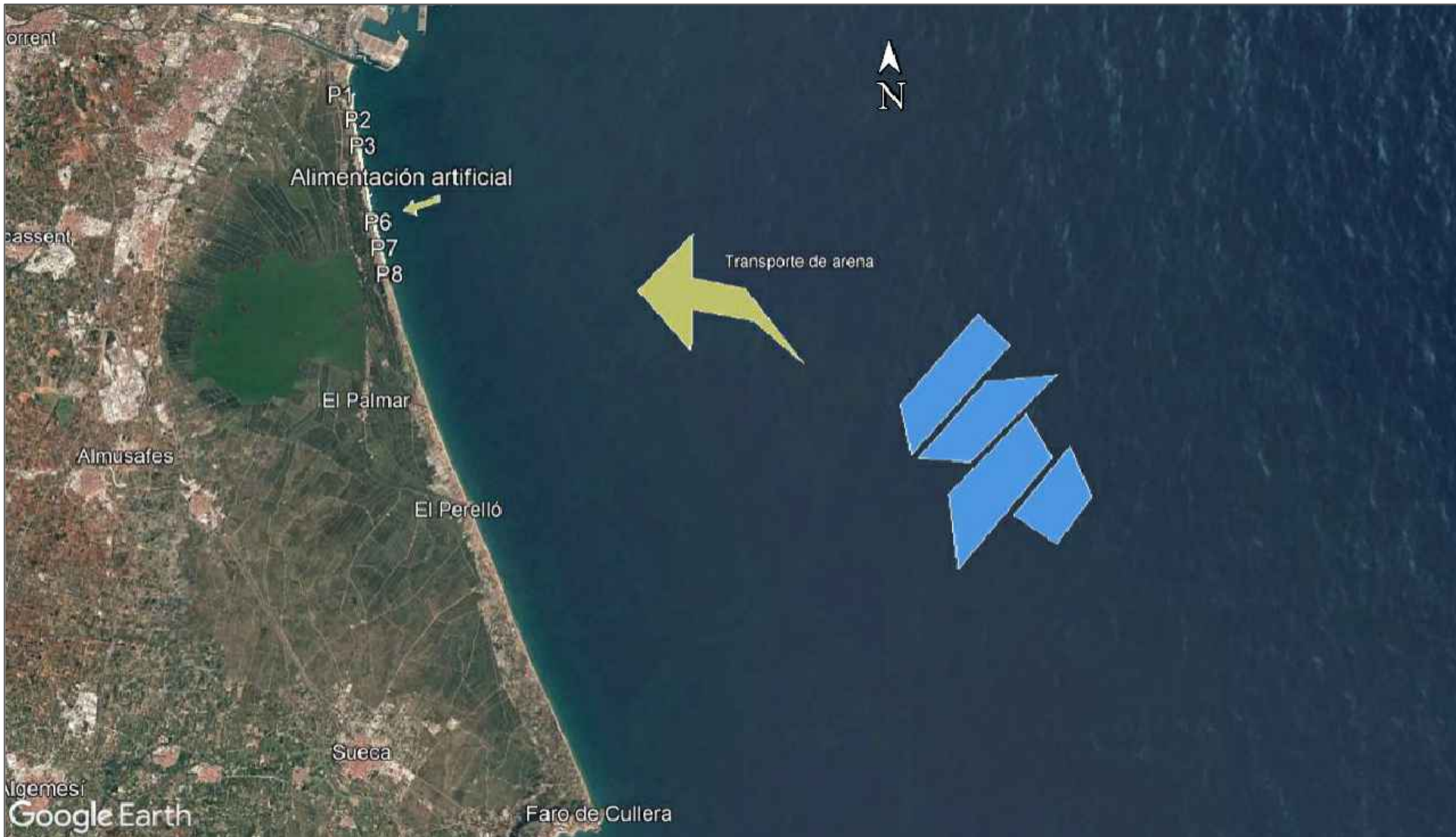
### **ODS 14. Vida submarina**

Los desequilibrios en la línea de costa pueden provocar también desequilibrios en el ecosistema marino. La construcción de grandes obras tales como los puertos también provocan grandes desequilibrios. Por tanto, en el planteamiento de las obras de alimentación artificial se debe contemplar provocar el menor daño posible a la vida submarina, por ejemplo, mediante el empleo de tuberías de vertido.

## ANEXO 2. PLANOS









ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE CAMINOS  
CANALES Y PUERTOS

Título:

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera

COMPROMETIDA CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Autor:

Eduardo Ortuño Moreno

Firma:

Escala

1:30.000

Fecha

Junio de 2022

Plano:

Propuesta de  
alimentación

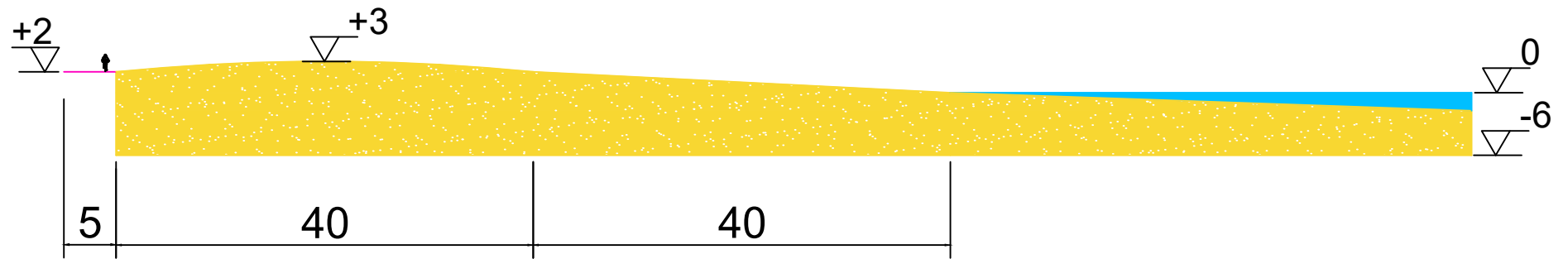
Número de plano:

2.2

Hoja:

3 de 7

## PERFIL ESTADO ACTUAL



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE CAMINOS  
CANALES Y PUERTOS

Título:

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera

COMPROMETIDA CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Autor:

Eduardo Ortuño Moreno

Firma:

Escala

1:600

Fecha

Junio de 2022

Plano:

Comparativa de  
perfiles

Número de plano:

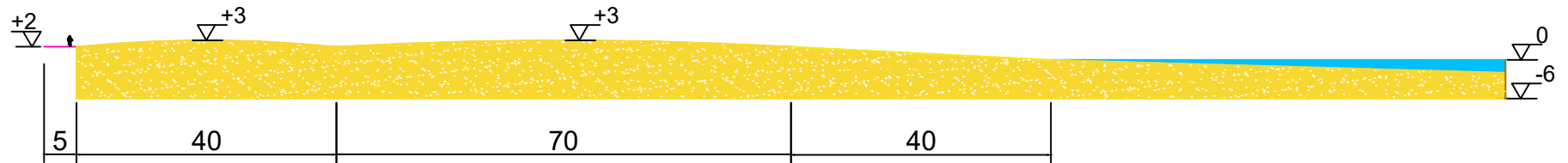
3.1

Hoja:

4 de 7



PERFIL PROYECTADO



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE CAMINOS  
CANALES Y PUERTOS

Título:

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera

COMPROMETIDA CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Autor:

Eduardo Ortuño Moreno

Firma:

Escala

1:1000

Fecha

Junio de 2022

Plano:

Comparativa de  
perfiles

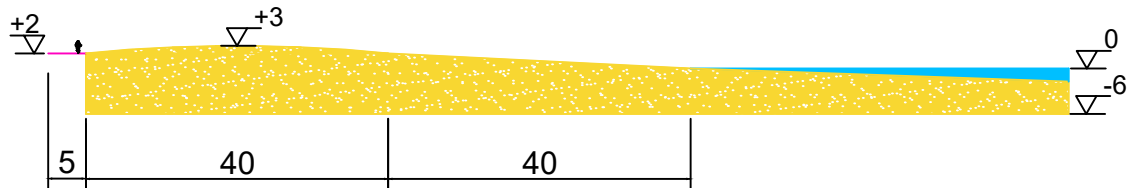
Número de plano:

3.2

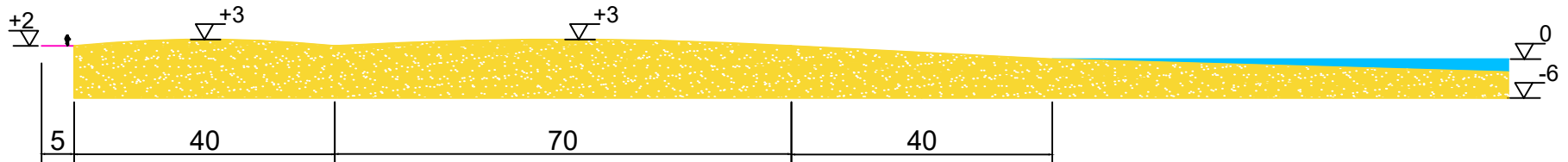
Hoja:

5 de 7

PERFIL ESTADO ACTUAL



PERFIL PROYECTADO



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE CAMINOS  
CANALES Y PUERTOS

Título:

Estudio de la evolución del transporte sólido litoral debido al cambio climático mediante el análisis de series históricas. Aplicación a las playas entre el Puerto de Valencia y el Cabo de Cullera

COMPROMETIDA CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Autor:

Eduardo Ortuño Moreno

Firma:

Escala

1:1000

Fecha

Junio de 2022

Plano:

Comparativa de  
perfiles

Número de plano:

3.3

Hoja:

6 de 7

