

Erosión costera inducida por la subida del nivel del mar. Evidencias mareográficas

Coastal Erosion Induced by Sea Level Rise. Tidal Evidence

José Manuel de la Peña Olivas^{1*}

Resumen

La subida del nivel del mar debido al cambio climático provoca una pérdida de playa, o erosión. En la mayoría de los trabajos esto se estudia a futuro; pero, en este artículo se analiza cual es esa subida que señalan los mareógrafos para la costa mediterránea española hasta el momento y su tasa a futuro próximo que indican los datos. A continuación, con los datos disponibles se determina la tasa erosiva que esos datos provocan en las playas levantinas peninsulares.

Palabras clave: Subida del nivel del mar, erosión en playas, cambio climático, predicciones del nivel del mar, evolución de la costa.

Abstract

The sea level rise due to climate change causes a loss of beach, or erosion. In most of the works this is studied in the future; but, in this article, we analyse the rise indicated by the tide gauges for the Spanish Mediterranean coast so far and its rate in the near future, as indicated by the data. Then, with the available data, the erosion rate that these data cause on the peninsular Levantine beaches is determined.

The sea level rise due to climate change causes a beach loss, or erosion. In most works this is studied in the future; But this paper analyses but in this article the rise that the tide gauges indicate for the Spanish Mediterranean coastline so far and its rate in the near future indicated by data. Next, with the available data, the erosion rate that these data cause on the peninsular Levantine beaches is determined.

Keywords: Sea level rise, coastal erosion, climate change, sea level forecasts, evolution of the coastline.

1. INTRODUCCIÓN

Durante tiempo, artículos, informes, periódicos, etc., nos han ido diciendo, en ocasiones casi amenazando, que el mar iba a subir y nos iba a inundar, como si estuviésemos metiendo más agua a la piscina; todo ello debido al cambio climático. Los más escépticos dicen que eso no existe: es una invención de mentes calenturientas; otros que el cambio climático siempre ha existido, etc.; otros al fin dicen que eso es cosa de los políticos y... a seguir viviendo. Para todos ellos van dedicadas estas pequeñas líneas, para aquellos que no crean que estamos transformando el clima y la tierra misma y la vamos a dejar como “unos zorros” para nuestros hijos, nietos, bisnietos, etc., que aparte de ser una temeridad es una estupidez: porque lo crean o no está pasando irremisiblemente.

2. OBJETIVO

Cuando se realiza un estudio de costas siempre se introduce el apartado de cambio climático y previsiones de subida del nivel del mar; indicando los horizontes de subida que se debe considerar; y ninguno introduce en la valoración de la evolución de la costa este componente, dejándose para ese horizonte, para ese futura que parece que no ha llegado

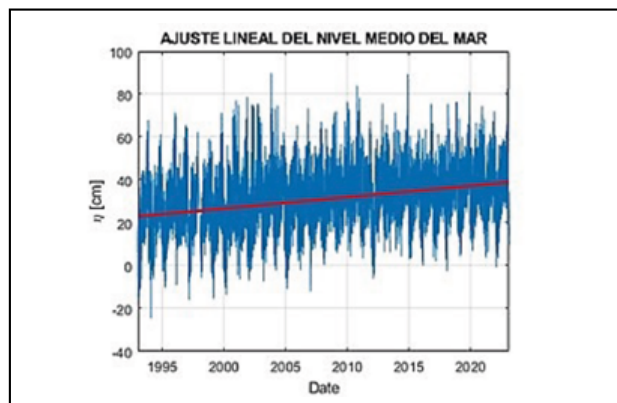


Figura 1. Serie temporal y tendencia del nivel medio del mar en Barcelona según mareógrafo de Puertos del Estado.

todavía; pero los datos que se manejan de los mareógrafos no indican eso. Así, por ejemplo, el nivel del mar en la costa barcelonesa del Maresme ha experimentado una subida en 30 años de datos, casi dos ciclos metónicos², una tendencia ascendente en ese periodo (1993-2023 de 16 cm, figura 1); esto es, una subida media de 5 mm año.

Todo ello está indicando que no es un horizonte el que debe tomarse sino el presente y pasado para conocer cuánto de la erosión de la costa se debe a esta subida y no achacarla a otros factores, que puede que tengan responsabilidad de otro tanto.

* E-mail: jose.m.pena@cedex.es

¹ Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. Responsable del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

² Común múltiplo aproximativo de los periodos orbitales de la Tierra y de la Luna.

La intención de este trabajo es poner de manifiesto que esa subida no es que se vaya a producir, sino que se está produciendo y en unos niveles que, dejando aparte lo alarmante de ello, deben tenerse en cuenta a la hora de evaluar la erosión que produce en las playas.

Para ello, el primer paso a dar es conocer el estado del arte de las predicciones de subida del nivel del mar debido al cambio climático, que llevan más de un siglo realizándose, y se presentan las diversas curvas de predicción de la subida hasta la actual.

El siguiente escalón es ver los datos de las diversas redes de medida existentes en la costa mediterránea española y periodos de datos. Posteriormente se analiza cada una de ellas y se calcula la tendencia media de subida. A continuación, con esa subida media y con la pendiente media en playas, según fachada litoral, se determina la tasa erosiva que debe considerarse y achacar a la subida del nivel del mar debido al cambio climático.

Tras un análisis de los errores y simplificaciones, se comparan los datos observados con los datos “oficiales” para obtener las desviaciones que se están produciendo en las curvas globales de predicción.

3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Para tratar de los antecedentes y conocimiento actual de la subida del nivel del mar debido al cambio climático debido al efecto producido por los gases de efecto invernadero se ha seguido la metodología que hemos presentado en otros trabajos (Peña y Sánchez, 2018 y 2020; Peña 2022). Para ello primeramente se da un breve repaso de lo que se conoce como cambio del nivel de mar y sus diferentes tipos; a continuación se trata de las predicciones de esta subida que se han ido haciendo a lo largo de la historia hasta la actualidad; y, finalmente, se trata de los modelos más comunes que se tiene para conocer la respuesta que tiene la costa flexible ante este fenómeno que va a servir para determinar la erosión que se va produciendo en las playas debido a esta subida que hoy en día parece imperceptible, pero que es real.

3.1. Cambios de nivel del mar

A lo largo de la dilatada historia de la Tierra, el nivel del mar ha estado oscilando continuamente. Estos cambios o variaciones del nivel del mar respecto a la masa sólida de la tierra se conocen como eustáticos. Como escribe Fairbridge (1961): “Cambios en los niveles del mar los ha observado el hombre desde la antigüedad más temprana y la literatura está llena de datos no correlacionados...”. Pero, como también dice este autor, los cambios eustáticos a largo plazo solamente se pueden determinar mediante una toma de datos a lo largo de todo el mundo.

Fairbridge (1961) indica que las cuatro hipótesis teóricas existentes no excluyentes para explicar la variación de la línea de costa son:

- I. Hipótesis de la flexión continental: Supone que las márgenes continentales están continuamente creciendo con una subsidencia de las cuencas adyacentes, que es una parte integral de la teoría de la isostasia.

- II. Hipótesis de la margen oscilante: Los continentes están sometidos a oscilaciones lentas en las regiones costeras; pudiéndose elevar una costa mientras que se hunde otra.
- III. Hipótesis geodésica: Considera la posibilidad de los cambios en el movimiento y forma de la Tierra como una unidad. Estos cambios pueden ser debidos a la rotación de la Tierra, fuerzas gravitacionales, etc. que pueden producir pequeños cambios en la velocidad angular de la tierra, momento de inercia, etc.
- IV. Hipótesis eustática: Tiene en cuenta el cambio del nivel del mar respecto a los continentes. Para ello consideran diferentes causas como la forma de los océanos, el volumen de agua, etc. Por tanto, hay que tener en cuenta que existe más de un tipo de eustatismo, siendo los más relevantes los siguientes:

1. *Glacio eustatismo*: Es la variación total del nivel del agua de los océanos por cambios climáticos, especialmente temperatura, siendo los principales los que representan la alternancia de las glaciaciones e interglaciaciones en los que el agua congelada se acumula en los continentes, reduciéndose el agua líquida en las cuencas oceánicas que provoca un descenso del nivel del mar en el periodo glacial y, tras él, el aumento de temperatura provoca el efecto contrario, elevándose el nivel del mar y, en mucha menor medida, los continentes al reducirse la presión sobre ellos.
2. *Termo eustatismo*: Se produce debido a los cambios de temperatura del agua de mar y, por tanto, su densidad. Así, por ejemplo: si la temperatura del agua pasase de 0 ° a 4 °C (con una salinidad del 3,5 %) la densidad cambiaría de 1,02811 a 1,02778, y si suponemos (Fairbridge, 1961; Bruun, 1962) la masa de agua total en 1370.106 km³ y la superficie de los océanos 360.106 km²; la bajada del nivel del mar, en este caso, se situaría en 1,22 m aproximadamente, por este concepto. A partir de esta temperatura, la densidad disminuiría y, por tanto, el nivel del mar subiría en esa proporción.
3. *Tecto eustatismo*: Son todos los fenómenos y deformaciones tectónicas que producen un cambio en los fondos marinos y en los continentes, tales como; elevación de cordilleras, subsidencia, etc. Pueden ser de cuatro tipos básicos:
 - a) Local: Por ejemplo, una erupción volcánica.
 - b) Lineal: Por ejemplo, debido a pliegues y trincheras orogénicas.
 - c) Regional: Como el colapso de una zona.
 - d) Oceánico: Cuando afecta a toda una zona oceánica o de mar.
4. *Sedimento eustático*: Debido al incremento de sedimentos, causando desplazamientos del agua. Puede ser de sedimentación pelágica o terrígena.
5. *Otros procesos eustáticos*: Como por ejemplo el aumento de la cantidad de agua por aportación de las erupciones volcánicas.

Todas estas hipótesis pueden ser de aplicación, al menos parcialmente, aunque la cuarta de ellos, eustática, es la de más amplia aplicación, mientras que las hipótesis geodésicas y tectónicas no son de aplicación universal; variando

de región a región. Pero, aunque nos centremos en una de las hipótesis y causas, se debe tener siempre presente el resto de los factores a la hora de hacer una evolución, como dice Fairbridge (1961). Dentro de estas consideraciones hay que también conocer los ciclos meteorológicos (Fairbridge, 1961; Bruun, 1962; Losada *et al.*, 2007), que según su periodo se clasifican en:

- **Cortos:** 11, 22, 40, 80, 189 y 567 años debido a manchas solares, fenómenos geomagnéticos, movimiento relativo de los planetas (Tierra-Luna-Sol), etc.
- **Medios:** 570 años (oscilación eustática), 1.600-1.700 años (tercer armónico).
- **Largos:** 21.000, 40.000 y 92.000 años, controlan las variaciones absolutas y hemisféricas en la radiación solar efectiva.

Una vez conocido, *grosso modo*, los factores que producen una variación relativa entre el mar y la tierra que hacen que la línea de orilla se desplace, hay que considerar que dentro de estos factores se encuentra el “cambio climático” producido por la actividad humana con un incremento de la temperatura, efecto invernadero, que hacen activar aún más los factores que producen el eustatismo.

3.2. Predicciones de cambios del nivel del mar

Para conocer el desplazamiento hacia tierra de la línea de costa, una vez conocido los fenómenos que lo provocan, hay que saber cuánto ha subido y cuánto se tiene previsto que suba debido al “cambio climático” producido por la actividad humana.

La detección del incremento del nivel medio del mar. Dean (1991), en su trabajo sobre este mismo tema, escribe:

“Con el documentado incremento de dióxido de carbono y otros tipos de gases en la atmosfera, una considerable investigación durante la última década se ha centrado en el efecto invernadero y su impacto futuro en el cambio climático mundial y el cambio eustático del nivel del mar...”

Y hace referencia a diversos datos que determinaban el incremento del nivel del mar, todo ellos locales, en las costas

americanas; pero, indican a las claras que este problema ya se había detectado en el pasado reciente. Así, muestra el aumento del nivel del mar detectado en la costa de EE. UU. hasta 1986 en dos franjas de tiempo, que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de la subida del nivel del mar en las costas de EE. UU. (Dean, 1991)

Zona	Periodo (años)	
	1940-1962 (mm)	1962-1986 (mm)
Costa este	3,4	1,8
Golfo de México	2,7	3,0
Costa oeste	3,0	1,3
Costa de Florida	2,2	1,3

Añade a estos datos las predicciones que entonces manejaba el gobierno americano (National Research Council, 1987) de diversos estudios de Hoffman *et al.* (1983), cuyo resumen se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Estimación de la subida del nivel del mar en cm (National Research Council, 1987)

Investigador/ límites	Años				
	2000	2025	2050	2075	2085
Hoffman <i>et al.</i> (1986)					
Inferior	3,5	10	20	36	44
Superior	5,5	21	55	191	258
Hoffman <i>et al.</i> (1983)					
Inferior	4,8	13	23	38	
Medio inferior	8,8	26	53	91	
Medio superior	13,2	39	79	131	
Superior	17,1	55	117	212	

Estas estimaciones se pueden comparar con las actuales previsiones del sexto informe (IPCC AR6 Sea Level Projection, 2021), para ello se ha incorporado las estimaciones extremas de Hoffman de 1986 que aparecen en la tabla 2, en la gráfica de estimación de subida del nivel del mar que contiene el sexto informe (figura 2). Como puede apreciarse, las previsiones actuales son algo más cautas, o inferiores, a las que aparecían en los primeros tiempos (Dean, 1991); si bien, en ellos, parece que se refiere a las

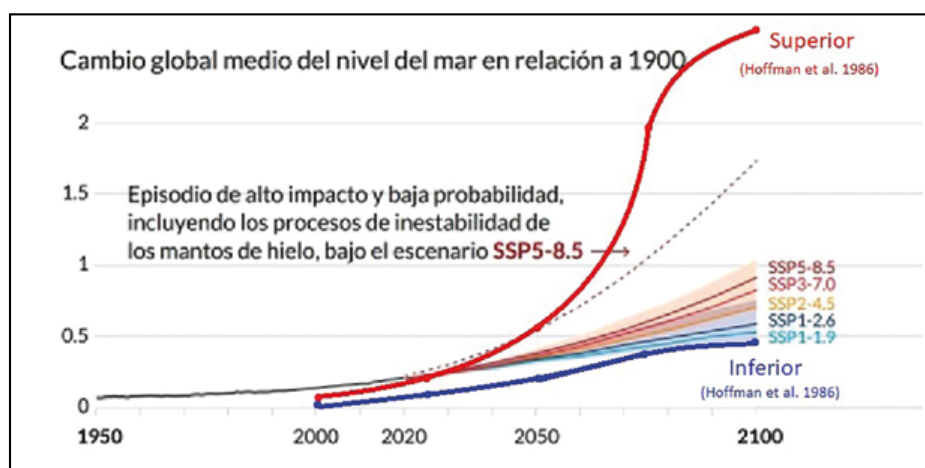


Figura 2. Variaciones del nivel medio global del mar estimadas para diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero en el que se ha incluido las predicciones de Hoffman *et al.*, 1986 (Fuente grafica original: Informe Grupo de Trabajo I del IPCC, 2021).

costas de EE. UU., como se ha escrito, mientras que las previsiones actuales son globales, no centrados en un continente. En todo caso, estos datos muestran que ya en el pasado reciente se había detectado y estudiado este fenómeno de subida del nivel del mar debido al cambio climático por el efecto invernadero por la emisión de gases contaminantes. Tal es así que Dean (1991) muestra datos tomados en EE. UU. de las variaciones del nivel del mar desde 1880 que indicaban una subida de nivel, presentaba una inflexión en ella en 1932, a partir de ella aumenta la tendencia de crecimiento de la subida del nivel del mar.

Si se considera la información sobre proyecciones proporcionada por la herramienta de proyección de nivel del mar del sexto informe del IPCC desarrollada por la NASA³, los valores que se obtienen para las proyecciones en las costas de Alicante para 2050 y 2100 se muestran en la tabla 3, donde se presentan los valores medios y límites inferior y superior del intervalo de confianza del nivel medio global del mar actual y a medio y largo plazo para cada escenario

Tabla 3. Valores medios y límites inferior y superior del intervalo de confianza del nivel medio del mar actual y a medio y largo plazo en Alicante

Escenarios		SSP2-4.5			SSP5-8.5		
Cuantiles NMM (m)		Q5	Q50	Q95	Q5	Q50	Q95
Años	2050	0.07	0.18	0.34	0.09	0.21	0.37
	2100	0.21	0.47	0.91	0.40	0.68	1.21

4. MODELOS DE RESPUESTA DE LA LÍNEA DE COSTA

Una vez conocida la subida del nivel del mar en cada momento, pasado o futuro, habría que determinar qué retroceso se ha producido o puede esperarse con ella. Para eso se utilizan los llamados modelos de respuesta que intentan calcular y predecir el retroceso que se produce cuando en una playa la superficie del mar se eleva debido al cambio climático (figura 3).

Básicamente, existen tres modelos que aproximan a conocer cómo va a ser la respuesta de la línea de costa y el perfil de playa, siendo éstos:

- Regla de Bruun (1962)
- Dean (1987)
- Kriebel y Dean (1993)

³ <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

El primero de ellos es válido cuando la costa es flexible y la subida del nivel del mar es progresiva, de tal manera que los procesos permitan a la costa adaptarse en todo momento, casi de manera continua. El segundo, es una variante del primero que tiene en cuenta la variabilidad natural del oleaje y del sedimento. El tercero, se determinó para ver la penetración del mar cuando existe un temporal y por tanto el mar se eleva; lo que podría asimilarse cuando lo que se produce es más veloz que lo que tiene en cuenta el primero de ellos. Todos estos modelos consideran que únicamente es el transporte transversal de sedimentos el causante de la respuesta del perfil de playa al cambio del nivel del mar; aunque todos ellos son compatibles con un movimiento longitudinal de sedimentos, si bien podría causar cambios en la posición de la línea de costa (Dean, 1991). En ellos se determina la penetración del mar sobre la tierra y la transformación del perfil de playa.

A continuación, se da un repaso de cada uno de ellos para conocer cómo se calcula esa erosión, o retroceso, de la costa.

4.1. La regla de Bruun (1962)

En 1962 Per Bruun presentó por primera vez en su trabajo “Sea level rise as a cause of shore erosion”, una relación entre la subida del nivel del mar y la recesión en la línea de costa que se producía por este efecto. Este trabajo hoy en día ha sido matizado y ampliado. Sin embargo, durante décadas se ha considerado un referente importante en la ingeniería de costas, estando hoy en día en pleno uso para los técnicos por su facilidad de uso y entendimiento físico del problema planteado.

Bruun, al estimar la erosión a largo plazo en las playas de Florida, supuso que la erosión era debida a la subida del nivel del mar respecto a la tierra. El método de Bruun asume que el perfil se mueve sin cambiar su forma y que no requiere una forma específica para el perfil de equilibrio. Considera que la costa está en equilibrio cuantitativo, esto es; la misma cantidad de material que entra es la que sale. Se supone que con la elevación del agua se produce una erosión, para restablecer el equilibrio original del perfil, todo él debe moverse hacia la costa en la misma distancia que se ha producido la recesión hasta la profundidad de cierre. Para conocer el estado final hay que realizar el balance entre lo erosionado y depositado del perfil (figura 4).

Al producirse una subida del nivel del mar, A, la cantidad de material por unidad de longitud necesaria para reestablecer la elevación del fondo sobre una distancia, B,

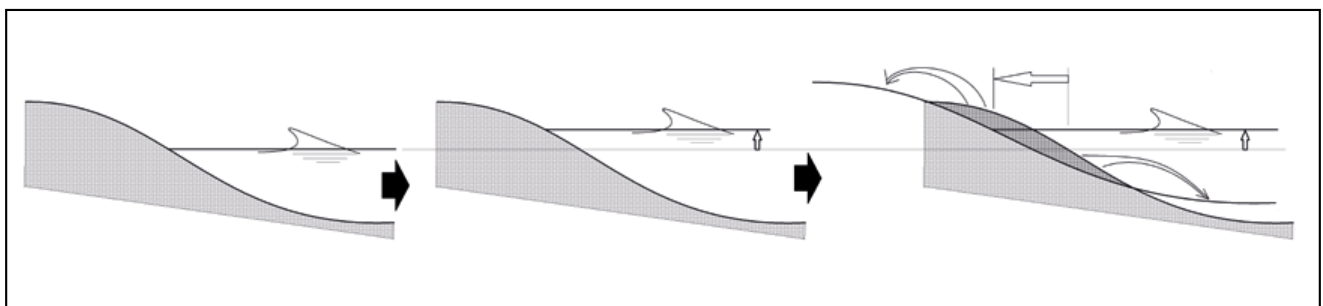


Figura 3. Proceso de transformación y retroceso del perfil de playa cuando sube el nivel del mar.

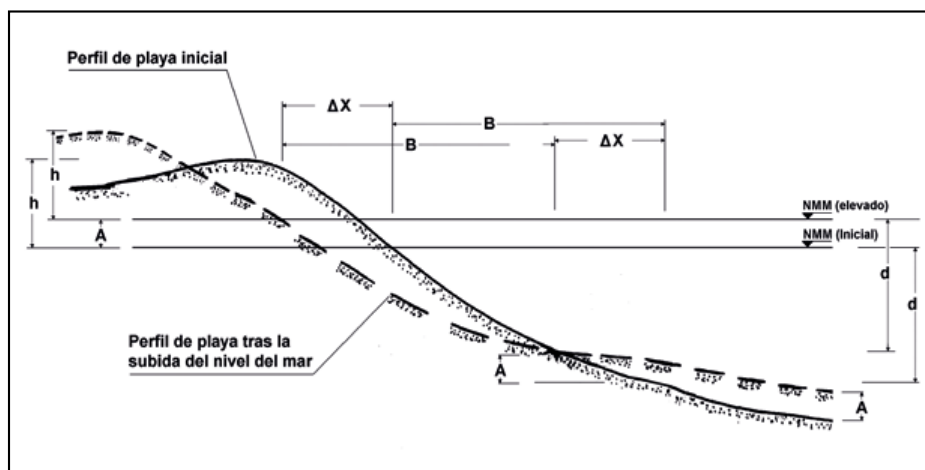


Figura 4. Variables utilizadas en la regla de Bruun para determinar la erosión costera debido a la subida del nivel del mar.

hacia el mar desde la línea de orilla sería AB. La longitud B es la distancia medida perpendicular a la línea de costa hasta la profundidad, d, a partir de la cual no hay movimiento significativo de sedimento.

El volumen de arena por unidad de longitud, AB, se obtiene por la erosión del perfil. El retroceso de la orilla ΔX se determina por un balance sedimentario entre el volumen AB con el área entre los dos perfiles. Esta área está dada por $\Delta X (h+d)$ y representa la cantidad de arena necesaria para restablecer el perfil original, siendo h la altura de la berma. Igualando los dos volúmenes da:

$$AB = \Delta X (h + d) \rightarrow \Delta X = \frac{AB}{(h+d)} \quad [1]$$

Esta ecuación requiere conocer la profundidad, d, y la distancia B. También se puede poner la ecuación de la forma siguiente

$$\Delta X = \frac{AB}{(h+d)} = \frac{A}{\tan \theta} \quad [2]$$

Siendo $\tan \theta$ la pendiente promedio sobre el perfil activo.

También podría determinarse esta recesión de la costa cuando se considere perfiles teóricos (Weggel, 1979). Así si se considera un perfil parabólico tipo Bruun-Dean de la forma:

$$y = C x^n \quad [3]$$

El retroceso de la costa ΔX ante una elevación A del nivel del mar sería:

$$\Delta X = \frac{A \left(\frac{d}{C} \right)^{\frac{1}{n}}}{(h+d)} \quad [4]$$

O si el perfil es del tipo exponencial:

$$y - y_0 = D e^{-ax} \quad [5]$$

En este caso, el retroceso de la costa ΔX ante una elevación A del nivel del mar sería:

$$\Delta X = \frac{A - \frac{\ln \left(1 - \frac{y_0}{D} \right)}{\alpha}}{(h+d)} \quad [6]$$

A la regla de Bruun se le han hecho más modificaciones y aplicaciones, como las que muestra Dean (1991). Siendo relevante la desarrollada por Dean y Maurmeyer (1983), cuando es una playa barrera con una laguna litoral (figura 5), siendo el retroceso de la costa ΔX ante una elevación A del nivel del mar:

$$\Delta X = A \frac{(B_L + W + B)}{(d + d_L)} \quad [7]$$

4.2. Dean (1987)

Este método se basa en los principios o premisas de la regla de Bruun. Tiene en cuenta la variabilidad natural del oleaje y del sedimento, y también contempla la posibilidad que este último tenga un movimiento hacia la costa. Considera tres características:

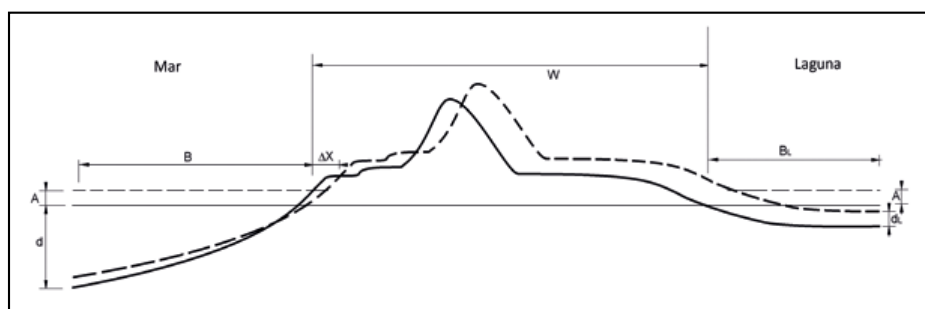


Figura 5. Aplicación de la regla de Bruun para una playa barrera de una laguna litoral según Dean y Maurmeyer (1983).

1. Los sedimentos tienden a clasificarse en el perfil, con los más gruesos en el estrán.
2. El oleaje es variable con las mayores energías concentradas durante los temporales menos frecuentes.
3. El sedimento es activo en toda la plataforma continental; pero en aguas profundas es menos intenso y frecuente.

Estos principios hacen que la profundidad de cierre, o límite del sedimento que considera la regla de Bruun, no se tenga en cuenta. El modelo también estima que puede producirse movimientos de sedimento hacia tierra y que una partícula está en equilibrio con un determinado nivel del agua y con la subida de ese nivel la partícula tenderá a un nuevo equilibrio debido a dos procesos:

1. Erosión de la línea de orilla migrando el grano de arena hacia arriba para restaurar el equilibrio.
2. La partícula se mueve hacia tierra hacia una profundidad menor. La ecuación que gobierna este proceso es:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{dA}{dt} = \frac{\partial Q_s}{\partial x} + \text{fuente} + \text{efecto de suspensión} \quad [8]$$

4.3. Kriebel y Dean (1993)

Estos autores presentaron en la revista del ASCE (American Society of Civil Engineers) un método analítico simple apropiado para cálculos preliminares de erosión, en función del tiempo, en dunas y playas y debido a temporales costeros importantes. Lo llamaron el Método de Circunvolución, y predice la respuesta de un perfil de playas al variar las condiciones del nivel del mar y del oleaje. El método se basa en la observación de las playas sometidas a erosión continuada por el oleaje y tienden hacia una forma de equilibrio de una manera exponencial. Como resultado, la respuesta de un perfil en el tiempo, ante la presencia de un temporal, puede ser expresado en forma de integral de circunvolución, partiendo de un estado inicial liso o plano, de la forma siguiente:

$$R(t) = \frac{R_\infty}{T_s} \int_0^t f(\tau) e^{-\frac{(t-\tau)}{T_s}} d\tau \quad [9]$$

Donde (figura 6): R_∞ = erosión máxima del perfil, que ocurriría si el temporal durase un tiempo suficiente, por lo que, en el caso de subida del nivel del mar debido al cambio climático, se puede considerar permanente y, por tanto, sería el alcance esperado. T_s = escala de tiempo de erosión, tiempo que tarda el perfil en alcanzar el 63 % del retroceso. τ = tiempo de demora.

La ecuación anterior sugiere que la respuesta del perfil de playa se retrasará respecto a las fuerzas erosivas (oleaje y subida del nivel del mar) y se reducirá respecto a la máxima erosión potencial. Consideraron la respuesta de la playa para una idealizada subida del nivel del mar por temporal del siguiente tipo:

$$f(t) = \sin^2(\sigma t) \quad \text{para } 0 < t < T_D \quad [10]$$

Siendo T_D la duración total de la subida y bajada del nivel del mar por el temporal, que, para la subida del nivel del mar debido al cambio climático, solamente se considera subida.

Analizaron la respuesta de un perfil de equilibrio cuando se producía un temporal que generaba una elevación del nivel del mar, S , y había una profundidad de rotura h_b . Utilizaron el perfil de equilibrio de Dean (1977 a 2002), tanto en el caso de pendiente infinita en la línea de orilla:

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad [11]$$

Como con la berma en pendiente [12]:

$$x = x_0 + \left(\frac{h}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{si } h > h_T$$

$$x = \frac{h}{m} \quad \text{si } h < h_T$$

Siendo: $x_0 = h_T/3m$, distancia de la línea de orilla al origen virtual de la forma del perfil de equilibrio cóncavo, donde $h_T = 4A^3/9m^2$ es la profundidad a la cual la pendiente lineal es tangente al perfil cóncavo.

Para este segundo caso, se supone un perfil inicial de playa cuya pendiente en aguas someras m se prolonga hasta la altura de berma, permaneciendo horizontal la playa seca a partir de alcanzar la altura de berma B . Se asume que la berma se erosiona sin cambiar la pendiente. Además, la conservación de la arena requiere que $V_1 + V_2 = V_7 + V_8$ (figura 7).

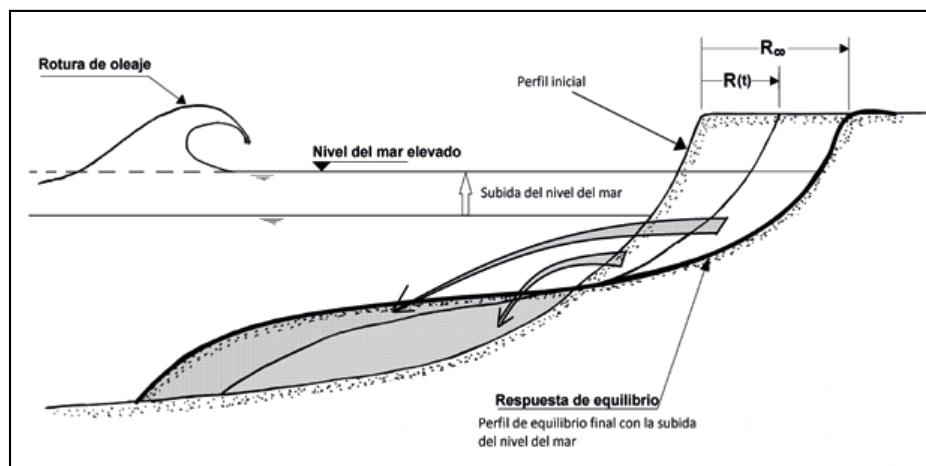


Figura 6. Definición de la respuesta del perfil de playa, según Kriebel y Dean (1993).

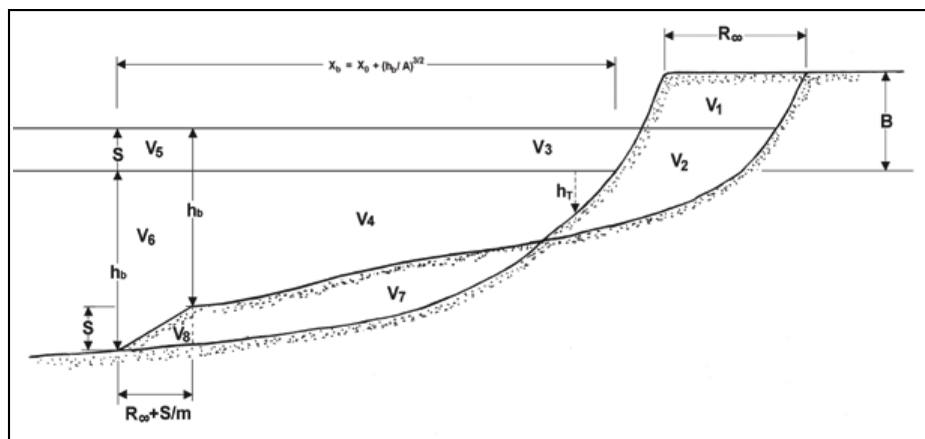


Figura 7. Esquema de modificación de un perfil con berma en pendiente para un temporal con una sobreelevación, set-up, S , según Kriebel y Dean (1993).

El retroceso que se produce de la línea de orilla (erosión) en la playa hacia la tierra debido a la sobreelevación y cambio de perfil correspondiente vendría dado por:

$$R_\infty = \frac{S \left(x_b - \frac{h_b}{m} \right)}{B + h_b - \frac{S}{2}} \quad [13]$$

Con:

$$x_b = x_0 + \left(\frac{h_b}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [14]$$

Para condiciones de temporal severo, donde h_b es grande, x_0 es prácticamente 0 y siendo: h_b = Profundidad en rotura, S = set-up, B = Altura de berma, R_∞ = retranqueo de la playa en temporal, m = Pendiente de la playa, A = Parámetro de Dean = $2,25 (w^2/g)^{1/3}$, w = Velocidad de caída del sedimento.

Este método tiene el inconveniente de que, al ser ideado para una subida temporal del nivel del mar, hay que adaptarlo a un caso donde se considera ésta permanente.

Por ello, lo más frecuente es utilizar la llamada “regla de Bruun” para determinar el alcance del mar al subir su nivel; usando sus variaciones para situaciones y casos singulares.

5. DETERMINACIÓN DE LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR ACTUAL

Para aproximarse a conocer la subida del nivel del mar actual hay que recurrir a una red de mareógrafos. En este caso, se ha utilizado REDMAR, que es la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado. Las estaciones más antiguas proporcionan datos desde julio de 1992. En la actualidad esta red cuenta con más de 30 estaciones a lo largo de las costas españolas. De todo el conjunto de ellas, se han tomado los datos de los mareógrafos de la costa mediterránea española.

5.1. Red de mareógrafos y datos de niveles del mar

La red de mareógrafos que se ha utilizado (figura 8) está compuesta por todos aquellos que se encuentran en la cuenca mediterránea española, siendo estas las siguientes



Figura 8. Mareógrafos de Puertos del Estado en la cuenca mediterránea española (Fuente: Puertos del Estado).

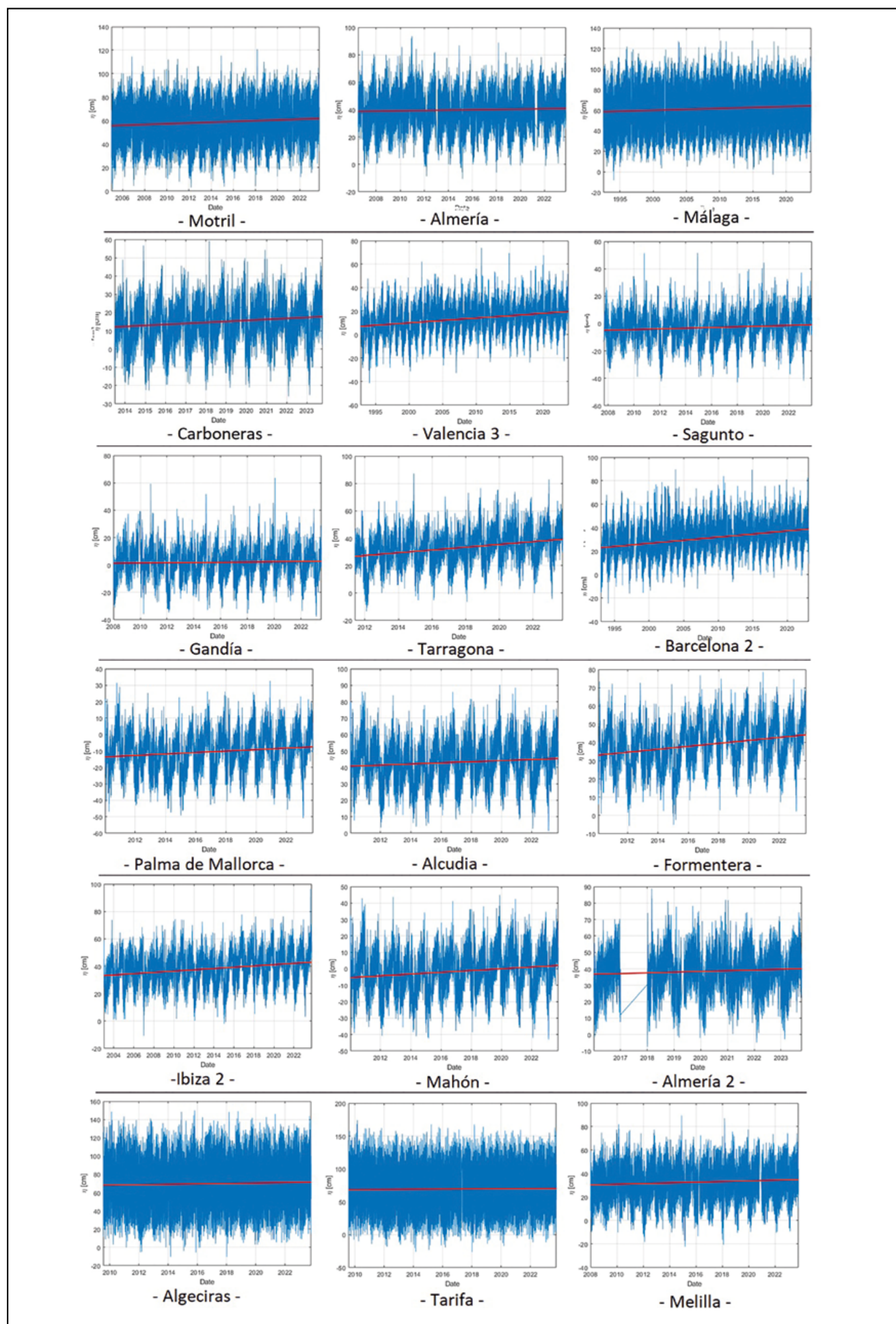


Figura 9. Ajuste lineal de las series temporales de mareógrafos.

estaciones: Motril 2, Almería, Málaga 3, Carboneras, Valencia 3, Sagunto, Gandía, Tarragona, Barcelona 2, Palma de Mallorca, Alcudia, Formentera, Ibiza 2, Mahón, Almería 2, Algeciras, Tarifa, y Melilla.

Cada una de estas estaciones se ha extraído la serie temporal y sobre ella se ha realizado un ajuste lineal, cuyo gráfico se muestra en la figura 9.

De cada uno de los mareógrafos se ha extraído: Período de toma de datos, series temporales totales, discretización entre marea astronómica y residual, distribución de probabilidad, ajuste normal, tendencia del nivel medio total del mar.

Los resultados se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Mareógrafos de Puertos del Estado en el Mediterráneo (período de actividad, y tendencia total y anual)

Período	Años	Mareógrafo	Puerto	Subida total (cm)	Subida anual (cm/a)
2005-2023	18,78	3543	Motril 2	6,16	0,33
2006-2023	17,29	3545	Almería	2,14	0,12
1992-2023	31,30	3546	Málaga 3	5,75	0,18
2013-2023	10,30	3547	Carboneras	5,63	0,55
1992-2023	31,04	3651	Valencia 3	12,54	0,40
2007-2023	16,12	3655	Sagunto	4,13	0,26
2008-2023	15,52	3656	Gandía	1,42	0,09
2011-2023	12,37	3756	Tarragona	12,52	1,01
1993-2023	30,12	3758	Barcelona 2	15,95	0,53
2010-2023	13,78	3851	Palma de Mallorca	6,11	0,44
2010-2023	13,78	3853	Alcudia	4,68	0,34
2010-2023	13,73	3855	Formentera	11,17	0,81
2003-2023	20,79	3856	Ibiza 2	9,85	0,47
2010-2023	13,78	3860	Mahón	7,41	0,54
2016-2023	7,78	3548	Almería 2	3,40	0,44
2009-2023	14,23	3541	Algeciras	3,27	0,23
2009-2023	14,23	3540	Tarifa	1,72	0,12
2008-2023	15,78	3510	Melilla	4,55	0,29
Incremento medio anual: 0,40 cm/a					

Hay que hacer constar que, en ciertos mareógrafos, como el de Tarragona, existen problemas de exactitud en la fijeza de los aparatos y, por tanto, se debe tomar la medida como cualitativa, más que cuantitativa, ya que es posible existan errores de posición relativa. No obstante, este trabajo, pretende analizar la tendencia del conjunto de medidas a lo largo de la costa mediterránea española.

5.2. Resultados y análisis

Los resultados que muestran las series temporales y sus ajustes lineales del nivel medio del mar (figura 8) muestran una tendencia generalizada a una subida del agua en las costas mediterráneas; pero, esta elevación es desigual: si se toma el valor medio anual, se observa que, los 18 puntos de medida, se distribuye su incremento en los intervalos que aparecen en la tabla 5. Si de ella se eliminasen los datos extremos dispersos (oscuros en la citada tabla), el valor medio de incremento anual que da sería:

$$A_{med} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n} = \frac{5,24}{15} = 0,35 \text{ cm/a} \quad [15]$$

Tabla 5. Intervalos medios de subida del nivel del mar por estaciones

Intervalo (mm/a)	Número estaciones
0 - 1	1
1 - 2	3
2 - 3	3
3 - 4	2
4 - 5	4
5 - 6	3
6 - 7	0
7 - 8	0
8 - 9	1
9 - 10	0
> 10	1

Es posible que estas variaciones que se observan en la subida del nivel del mar en los diferentes mareógrafos (tabla 4) estén ocasionadas por otros fenómenos asociados como son las variaciones de la temperatura en ciclos estacionales (verano e invierno)⁴.

⁴ En esta vía está trabajando José María Grassa en el CEPYC, quien me ha facilitado esta idea para abrir nuevas vías de trabajo en este campo.

5.3. Comparación de los datos con las previsiones

Para conocer si estos datos que se obtienen de los mareógrafos siguen la misma tendencia que las predicciones de la subida del nivel del mar, se ha tomado las previsiones que del sexto informe se extraen de la NASA (desgraciadamente, el visor de esta entidad solamente calcula para la zona de estudio en ocho de los puntos donde están mareógrafos) cuyo resultado se resume en la tabla 6.

Como se observa en esta tabla (en rojo) existen tres mareógrafos que han registrado datos mayores que las previsiones más extremas (Barcelona, Palma de Mallorca y Almería 2). En general, estarían mostrando que las previsiones del sexto informe para que sean realistas deben tomarse en el estado más desfavorable de emisiones en el cuantil del 95 %. Estos datos indican que al considerar la subida del nivel del mar y los valores que se tienen que tomar, en las costas españolas, debe tomarse el escenario de máximas emisiones SSP5-8.5 con cuantiles entre el 70 % y 95 %, ya que las previsiones de subida en ciertos casos se han superado y, además, se estaría del lado de la seguridad.

6. EROSIÓN COSTERA DEBIDO A LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

Como se ha dicho al comienzo del trabajo, cuando se observa estudios e informes sobre la costa, el apartado que se ocupa de los efectos de la subida del nivel del mar se encuadra dentro de él como una monografía: a previsión a futuro; pero, lo cierto es que nos olvidamos de incluirlo como una tasa erosiva constante en otros apartados de dinámica litoral, balance sedimentario o evolución de la costa. Esta circunstancia era lógica hace alguna década; pero, no hoy en día cuando informe tras informe nos va indicando que no que el nivel del mar vaya a subir, sino que está subiendo, con una tasa erosiva de una cierta entidad que, en ciertos casos son comparables con la erosión debida a otras circunstancias.

Para ilustrar esta afirmación, se han hecho unos cálculos en determinados puntos de la costa mediterránea española donde se tiene datos de esa subida, que se han mostrado en el apartado anterior (figura 9, tablas 5 y 6).

Para ello se han tomado datos de diversos informes realizado por el CEDEX para la Dirección General de la Costa

y el Mar. Como dato general se han usado los que presenta el informe del CEDEX (2012) y se han complementado con otros informes del CEDEX para la citada Dirección General como son las Estrategias para la Protección de la Costa⁵ (Granada, Maresme, Castellón, Valencia Sur, Mar Menor y delta del Ebro).

En algunos casos no se han tenido datos para este trabajo, por lo que se ha dejado el resultado en blanco y se han rellenado con gris en la tabla 7 donde se resumen los resultados de estos cálculos preliminares. En ella se muestran los datos para el cálculo:

- **A (subida del nivel del mar):** La primera columna en cm es la registrada para el periodo de toma de datos (tabla 4), y en la segunda el valor medio (o tasa) de subida anual (tabla 4) corregido cuando están fuera de los intervalos medios (tabla 5) asignándoles en este caso la tasa media de 0,35 cm/a.
- **B (distancia de la costa de la profundidad de cierre):** Es el valor más variable, para mostrarlo se ha puesto en la primera estación (Barcelona) con cuatro puntos en la comarca litoral del Maresme donde se observa la variabilidad del efecto erosivo sobre la costa debido a la subida del nivel del mar debido al cambio climático.
- **H (altura de berma):** También es variable, y en los casos donde no se tienen datos, se ha tomado 2 m como valor medio, que sería aún más variable cuando tras la berma existe una duna de protección.
- **PdC (profundidad de cierre):** Los datos de esta profundidad pertenecen a la profundidad máxima; pero hay que tener en cuenta que ésta varía también con la subida del nivel del mar (figura 10).
- **Retroceso de la línea de orilla:** Tiene dos columnas, la primera es el retroceso que se ha producido en la costa hasta 2023 debido a la subida registrada en los mareógrafos (figura 9 y tabla 4). La segunda columna es la tasa erosiva anual que debe considerarse para el futuro hasta que se tengan nuevos datos de subida del nivel del mar que lo modifique.

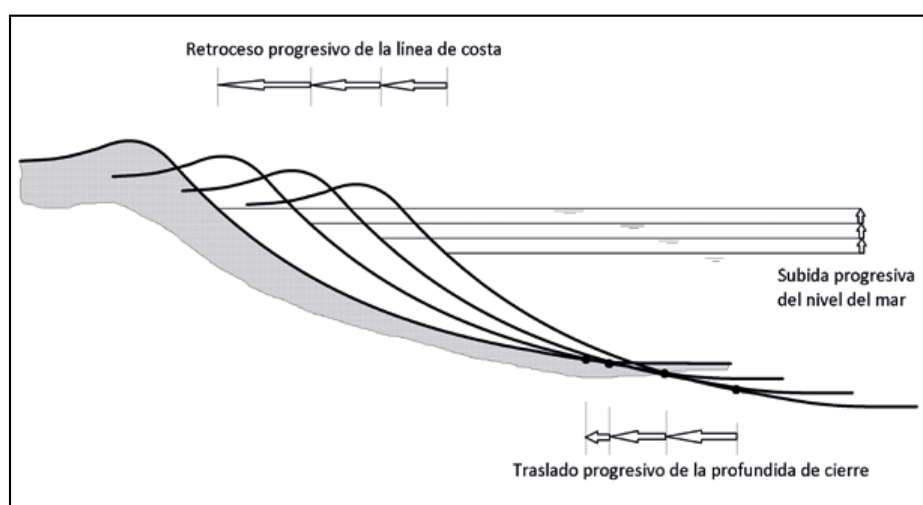
⁵ <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategias-proteccion-costa.html>

Tabla 6. Comparativa mareógrafos de Puertos del Estado en el Mediterráneo y previsiones NASA

Periodo	Años	Mareógrafo			Previsión NASA SSP5-8.5 (Q 95 %)	
		Puerto	Subida total (cm)	Subida anual (cm/a)	Subida total (cm)	Subida anual (cm/a)
2006-2023	17,29	Almería	2,14	0,12	5	0,31
1992-2023	31,30	Málaga 3	5,75	0,18	5	0,31
1992-2023	31,04	Valencia 3	12,54	0,40	7	0,44
1993-2023	30,12	Barcelona 2	15,95	0,53	8	0,50
2010-2023	13,78	Palma de Mallorca	6,11	0,44	6	0,37
2016-2023	7,78	Almería 2	3,40	0,44	5	0,31
2009-2023	14,23	Algeciras	3,27	0,23	5	0,31
2009-2023	14,23	Tarifa	1,72	0,12	6	0,37

Tabla 7. Erosión (retroceso) de la costa debido al cambio climático (subida del nivel del mar)

Zona	A		B (m)	H (m)	PdC (m)	Retroceso	
	(cm)	(cm/a)				(m)	cm/a)
Barcelona (Maresme)							
– Calella			739	3,8		7,96	26,46
– Arenys de Mar	15,95	0,53	1022	1,8	11	12,73	42,32
– Norte de Mataró			1392	1,6		17,62	58,55
– El Masnou			922	1,9		11,40	37,88
Tarragona (delta Ebro)	4,33	0,35	3.292	2	9,5	12,4	100,19
Palma de Mallorca	6,11	0,44		2			
Alcudia (Pollensa)	4,68	0,34	3.000	2	14,8	8,36	60,7
Formentera	4,81	0,35		2			
Ibiza 2	9,85	0,47		2			
Mahón	7,41	0,54		2			
Sagunto	4,13	0,26	667	2	10	2,30	14,45
Valencia (El Saler)	12,54	0,40	587	2	9	6,69	21,35
Gandía (Grao)	5,43	0,35	403	2	9	1,99	12,82
Carboneras (Manga)	5,63	0,55	600	2	10	2,82	27,5
Almería (Zapillo)	3,40	0,44	800	2	15,7	1,54	19,89
Motril (Torrenueva)	6,16	0,33	346	2	11,6	1,57	8,40
Málaga (Torremolinos)	5,75	0,18	800	2	11	3,54	11,08
Algeciras	3,27	0,23		2			
Tarifa	1,72	0,12		2			
Melilla	4,55	0,29	275	2	7,5	1,32	8,39

**Figura 10.** Evolución de la profundidad de cierre debido a la subida del nivel del mar en el tiempo.

7. CONCLUSIONES

Cuando se realiza un estudio de costas siempre se introduce el apartado de cambio climático y previsiones de subida del nivel del mar; indicando los horizontes de subida del nivel de mar que se debe considerar; y ninguno introduce en la valoración de la evolución de la costa este componente. Pero, lo cierto es que nos olvidamos de incluirlo como una tasa erosiva constante en otros apartados de dinámica litoral, balance sedimentario o evolución de la costa. Esta circunstancia era lógica hace alguna década; pero, en la actualidad, cuando se estudia la erosión de la costa se debe incluir la tasa erosiva debido a la subida del nivel del mar tanto la que se ha producido hasta el momento como la que se producirá, al menos con la tasa erosiva anual conocida debida a este concepto. Para facilitar la metodología se presenta en este artículo una vía sencilla para conocer en un punto concreto de la costa la

erosión debida a la subida del nivel del mar (y no englobar todo a un problema determinado diferente) y no hoy en día cuando informe tras informe nos va indicando que no que el nivel del mar vaya a subir, sino que está subiendo, con una tasa erosiva de una cierta entidad que, en ciertos casos son comparables con la erosión debida a otras circunstancias.

8. AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración desinteresada de los doctores Miriam García Oliva y José María Medina Villaverde; la primera me ha ayudado a analizar los datos del visor de la NASA y actualizarlos de acuerdo con el sexto informe, y el segundo porque ha extraído y procesado todos los datos referentes a los mareógrafos de REDMAR de Puertos del Estado.

9. REFERENCIAS

- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 88(1): pp. 117-130.
- Dean, R.G., y Maurmeyer, E.M. (1983). Model for beach profile response, en *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Boca Raton: CRC Press (Capítulo 4, pp. 151-166).
- Dean, R.G. (1991). Beach response to Sea Level Rise, en *The Sea. Ocean Engineering Science*, editado por B. Le Mehauté y D.M. Hanes (Vol. 9, Parte B). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Fairbridge, R.W. (1961). Eustatic changes in the sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 4, pp. 99-185.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA. En imprenta. doi:10.1017/9781009157896.
- Kriebel, D.L., y Dean, R.G. (1993). Convolution method for time-dependant beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 119(2): pp. 204-226.
- Losada, M.A., Baquerizo, A., Sánchez, E., Ortega, M., y Santiago, J.M. (2007). Variabilidad climática y morfológica litoral. Resúmenes de las IX Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, San Sebastián (España), 29-30 de mayo de 2007 (pp. 621-626).
- National Research Council (1987). *Responding to Changes in Sea Level: Engineering Implications*. Washington D.C.: National Academy Press.
- Peña Olivas, J.M. de la, y Antón Camacho, A.I. (2012). 3.3.4: Estudio de profundidad de cierre en las costas españolas partiendo de datos reales de seguimiento. Aplicación a criterios para regeneración de playas mediante alimentación artificial. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (n.º 22-410-5-001, informe técnico para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar). Madrid: CEDEX.
- Peña Olivas, J.M. de la, y Sánchez González, J.F. (2018). Respuesta de la costa a las variaciones del nivel del mar: efecto sobre las playas en España. *Ingeniería Civil*, n.º 191, pp. 74-85.
- Peña Olivas, J.M. de la, y Sánchez González, J.F. (2020). Lección 5: Cambio Climático, en *Curso de Ingeniería de Costas y Medio Ambiente Marino y Costero*. Madrid: CEDEX.
- Peña Olivas, J.M. de la (2022). *Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas*. Madrid: Editorial Garceta y Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Colección Seínor, n.º 39).
- Weggel, J.R. (1979). A method for estimating long-term erosion rates from a long-term rise in water level. U.S. Army, Corps of Engineers (Coastal Engineering Tec Technical Aid N.º 79-2).