

# Respuesta de la costa a las variaciones del nivel del mar: efecto sobre las playas en España

## Coastal Responses to Changes in Sea Level: Sea-Level Rise and Its Impact on Spanish Coastal Zones

José Manuel de la Peña Olivas<sup>1\*</sup> y José Francisco Sánchez González<sup>2</sup>

### Resumen

Uno de los efectos inmediatos del cambio climático provocado por el efecto invernadero en nuestro planeta es la subida del nivel del mar. Este problema se aborda en este artículo desde tres puntos de vista: 1) recopilación y análisis de estudios teóricos sobre sus repercusiones en el litoral - en las playas, fundamentalmente - y de las políticas y otras actuaciones administrativas que se han emprendido para adaptarse al cambio climático o para mitigarlo; 2) estudio de las causas de las variaciones del nivel del mar, las variables que lo gobiernan y la respuesta de la costa ante dichas variaciones; 3) por último, se presentan algunos de los estudios costeros más recientes llevados a cabo por el CEDEX que han tenido en cuenta el cambio climático.

**Palabras clave:** subida del nivel del mar, cambio climático, erosión costera, acciones técnicas, estudios costeros.

### Abstract

*The immediate outcome of climate change and greenhouse effect for our planet is sea-level rise. This issue is addressed in the present article in three ways. The first one explains the technical and administrative actions undertaken to reduce its effects. The second one, for its part, examines why changes in sea level occur and the variables that govern them, and also coastal responses. Finally, the third one shows some of the results of coastal studies that have considered climate change.*

**Keywords:** sea-level rise, climate change, coastal erosion, technical actions, coastal studies.

## 1. INTRODUCCIÓN

La variación del nivel del mar debido al cambio climático suscita gran interés de la población, autoridades y técnicos. En ocasiones, nos lleva a pensar que un incremento del nivel del mar actual se comportaría como si aumentásemos el volumen de agua en una piscina o en un lago, casi de manera instantánea; provocando una invasión de agua en la zona terrestre actual. Pero, con ser simple el fenómeno principal (un aumento progresivo del nivel de agua de los océanos y mares), los efectos asociados a él no son tan sencillos ni inmediatos. Primeramente, hay que considerar la velocidad de este incremento, de la que sabemos que es variable con tendencia a un incremento progresivo según las previsiones (IPCC, 2014). También sabemos que al aumentar la superficie de agua, el área generadora y propagadora del oleaje se verá alterada y que, a su vez, al cambiar el clima, cambian los fenómenos meteorológicos que lo generan. El cuenco de los océanos y mares no es estático, conocemos por geología que éstos pueden elevarse o sumergirse

dependiendo de fenómenos geológicos. Por último, también sabemos que las costas no son líneas estáticas, sino que están sujetas a fenómenos erosivos y de acumulación debido a la cantidad de sedimento que les llega y las acciones de los agentes climáticos que actúan sobre ellas.

Este último punto nos indica que la costa es un elemento activo a considerar en los efectos que provoca el cambio climático, esto es, se produce una reacción de la costa frente a las solicitaciones que actúan sobre ella. Dicha reacción de la costa depende de su tipología y de las características de su trasdós (espacio defendido por la costa). En este contexto, sabemos que existen métodos para conocer cómo se transformaría el litoral cuando es una playa; no obstante estos métodos se limitan al ámbito de la propia playa y no tienen en cuenta su entorno y condicionantes.

El objetivo de este artículo es mostrar desde diversas perspectivas cómo puede emplearse el conocimiento para estimar la variación del nivel del mar como consecuencia del cambio climático y su afición a la costa. En primer lugar (sección 2) se presentan diversas propuestas, presentadas desde mediados del siglo pasado hasta nuestros días, para estimar la evolución de la costa como consecuencia de la subida del nivel del mar; este apartado incluye también una mención a algunas de las políticas que están definiendo las autoridades nacionales e internacionales para adaptarse y mitigar sus efectos. En segundo lugar (secciones 3 y 4) se analizan las causas de las variaciones del nivel del mar y la evolución desde finales del siglo pasado de las proyecciones

\* Autor de contacto: [Jose.M.Pena@cedex.es](mailto:Jose.M.Pena@cedex.es)

<sup>1</sup> Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Consejero Técnico de Estudios Ambientales del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.

<sup>2</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Director de la U. A. De I+D+i del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX.



**Figura 1.** Peer Bruun con una serie de colegas en el congreso Coastal Dynamics de 2001 en Lund (Suecia).

de subida del nivel del mar para este siglo. Finalmente (secciones 5 y 6) se dedican a los modelos para estudiar la respuesta de la costa frente a las variaciones del nivel del mar y su aplicación en los trabajos realizados por el CEDEX en los últimos años. La sección 7 presenta a modo de epílogo una breve discusión sobre los resultados obtenidos.

## 2. ESTUDIOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA COSTA Y POLÍTICAS DE ACTUACIÓN

Entre los numerosos estudios que se han realizado sobre los efectos del cambio climático en la costa es ineludible comenzar con el trabajo de Peer Bruun (1962): “Sea-level rise as cause of shore erosion”, que inicia el camino al estudio del comportamiento de la costa al variar el nivel del mar, enunciando su famosa “Regla de Bruun”.

Posteriormente, Weggel (1979): “A Method for estimating long-term erosion rates from a long-term rise in water level”, lo aplicó utilizando su perfil teórico exponencial. Más tarde, Dean (1987 y 1991) solo o con otros autores (Kriebel y Dean 1993; Dean y Dalrymple 2001) ampliaron y enriquecieron el trabajo de Bruun. Inicialmente Dean (1987) determinó un método para calcular el gradiente de transporte de sedimentos transversal requerido para que se cumpliera la “Regla de Bruun”. En 1991, Dean realiza un trabajo muy interesante sobre la respuesta de la costa a la subida del nivel del mar; mostrando tendencias de subida del nivel del mar desde el siglo XIX e introduciendo la curva estimativa del crecimiento del nivel del mar hasta 2100 que auguraban diversos organismos entonces.

Con Kriebel, Dean (1993) publica un artículo: “Convolution method for time-dependant beach-profile response” en el que los dos autores analizan, desde un estado de equilibrio del perfil, *cómo cambia éste* cuando se eleva el nivel del mar. El libro que publica Dean con Dalrymple en 2001: “Coastal processes with engineering applications”, tiene un capítulo, el 7, dedicado al equilibrio de perfiles y en él se analiza este equilibrio cuando existe una subida del nivel del mar. En este último trabajo utiliza un método conocido

como Edelman (1972) que hizo este autor para el análisis de los cambios y elevación de dunas debido a cambios en el nivel del mar.



**Figura 2.** Robert G. Dean en Santander en 2007.

En España cabe destacar los trabajos publicados por Miguel Ángel Losada y su equipo relativo al nivel del mar. Especialmente interesante son aquellos que se presentaron en las IX Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos de 2007, celebradas en San Sebastián. Así, Ávila et al. (2007): “Modelo de respuesta de la línea de costa a la evolución eustática del nivel del mar”, utilizan la metodología de los trabajos anteriormente mencionados para proponer un modelo de respuesta de la línea de costa cuando cambia el nivel del mar; Losada et al. (2007) solamente lo publican en el libro de resúmenes, quizá porque implícitamente este trabajo, “Variabilidad climática y morfológica litoral”, se halle reflejado en la primera parte del trabajo anterior.

Las autoridades españolas no han sido ajenas al conocimiento e inquietud sobre los efectos que el cambio climático puede producir en la costa, a través especialmente de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) y

la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar. Son de destacar los trabajos promovidos por estas entidades y realizados por la Universidad de Cantabria que comienzan en 1998 con la publicación del “Atlas de Inundación del Litoral Español”. En 2005 se emite el trabajo “Impactos en la costa española por efecto del cambio climático” en tres fases; siendo una parte de la segunda la dedicada al desarrollo teórico (figura 3).

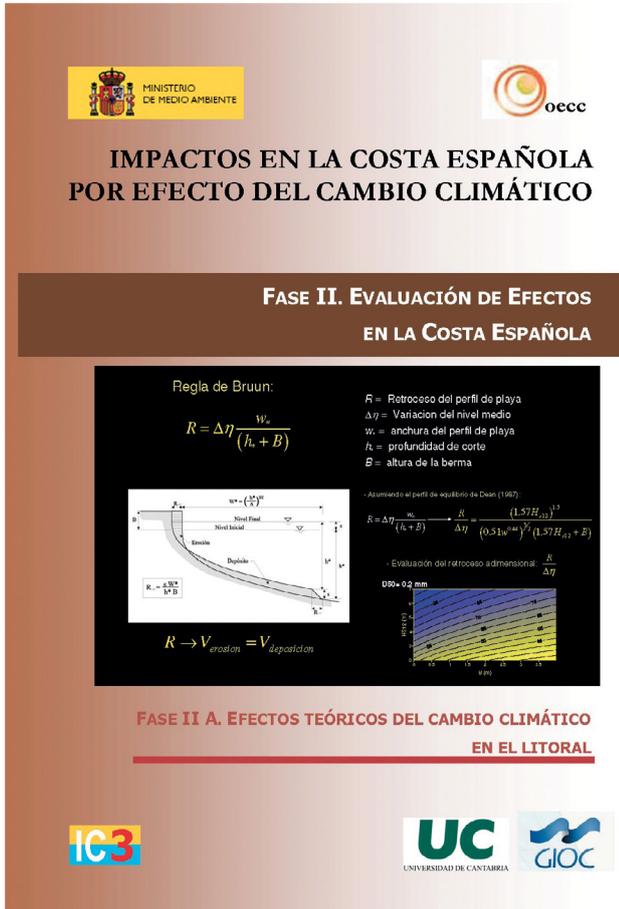


Figura 3. Portada de la publicación del Ministerio de Medio Ambiente realizado por la Universidad de Cantabria de 2005.

El “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)” fue aprobado en 2006, y en este mismo año 2006, la Oficina Española de Cambio Climático –OECC– del entonces Ministerio de Medio Ambiente lo edita.

El CEDEX, por su parte, en el marco de colaboración con la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y

del Mar (DGSCM), ha realizado numerosos trabajos relacionados con los efectos del cambio climático en las costas españolas. Entre ellos cabe citar aquel que hacía una delimitación preliminar de las zonas costeras españolas susceptibles de ser inundadas por el mar; o la aplicación de la “regla de Bruun” para conocer el alcance teórico en determinadas playas dentro de las estrategias de actuación de determinadas zonas costeras (Huelva, Maresme, Valencia, Castellón y Granada) entre los años 2011 y 2017.

En el año 2014 se publica las conclusiones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) “Quinto Informe de Evaluación. Volumen II” por el entonces Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. La consecuencia en la costa de la publicación anterior y del PNACC de 2006 son los dos trabajos promovidos por la DGSCM en 2015: “Estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española” y “Estudio ambiental estratégico para la evaluación ambiental de la estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española”.

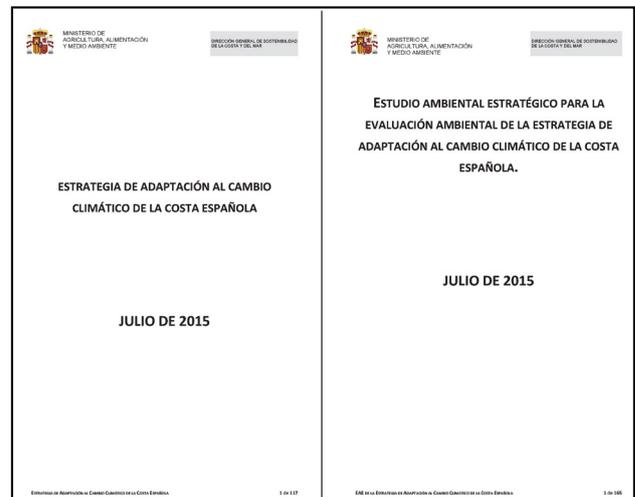


Figura 4. Portada de la dos publicaciones de 2015 del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente relativas a la estrategia de actuación ante el cambio climático.

A nivel comunitario, la Agencia Europea de Medio Ambiente (“European Environment Agency”) ha publicado en 2018 un informe titulado: “National Climate Change Vulnerability and Risk Assessment in Europe 2018” que analiza las diversas políticas de los estados miembros y asociados de adaptación al cambio climático. En su reflexión final da el mensaje de que todas las políticas deben coordinarse y

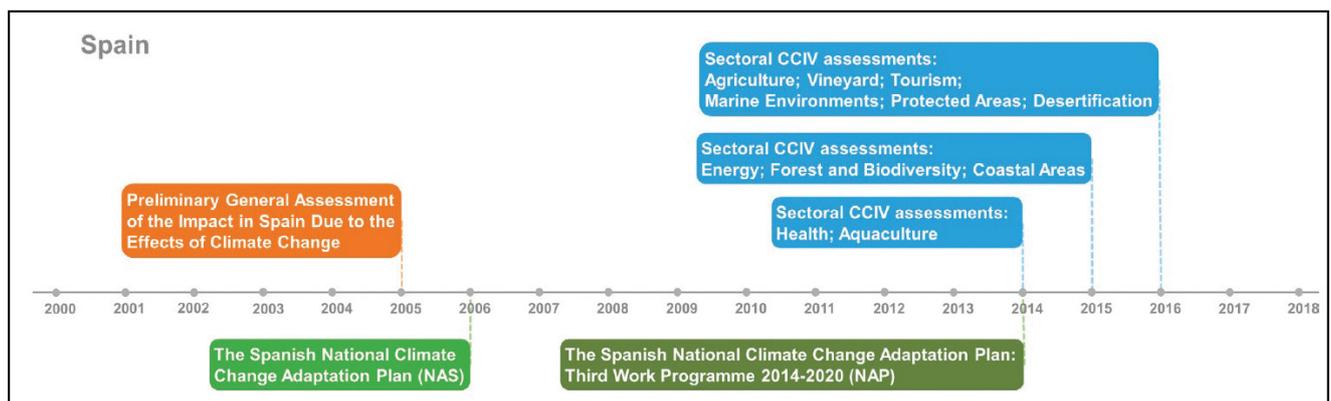
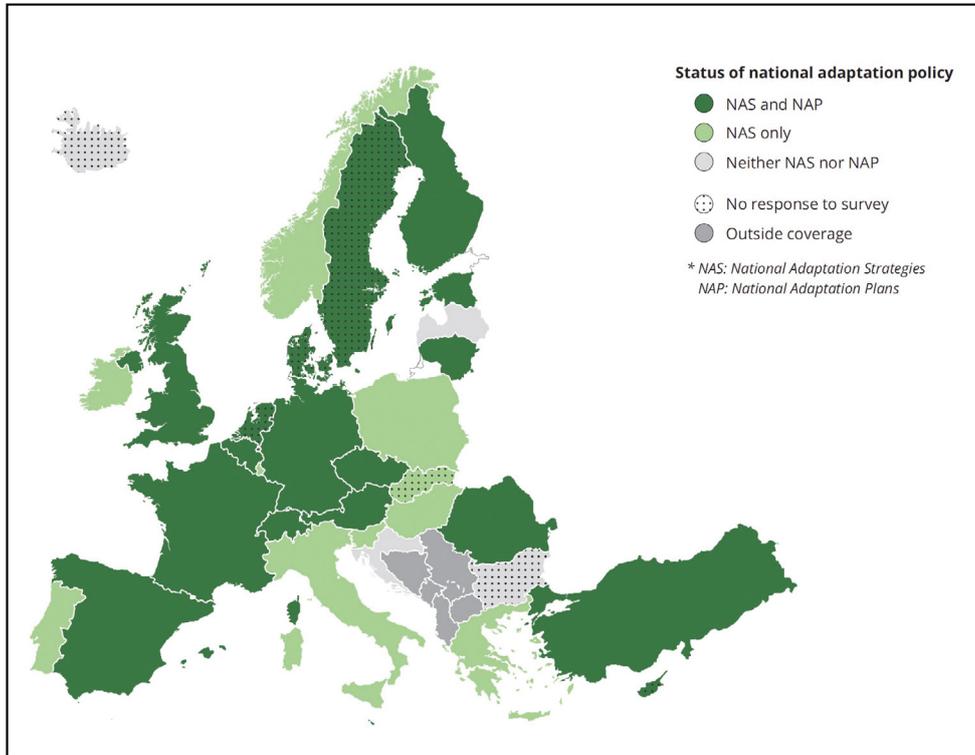


Figura 5. Cronograma de información de CCIV y políticas desarrolladas de adaptación (Fuente: European Environment Agency).

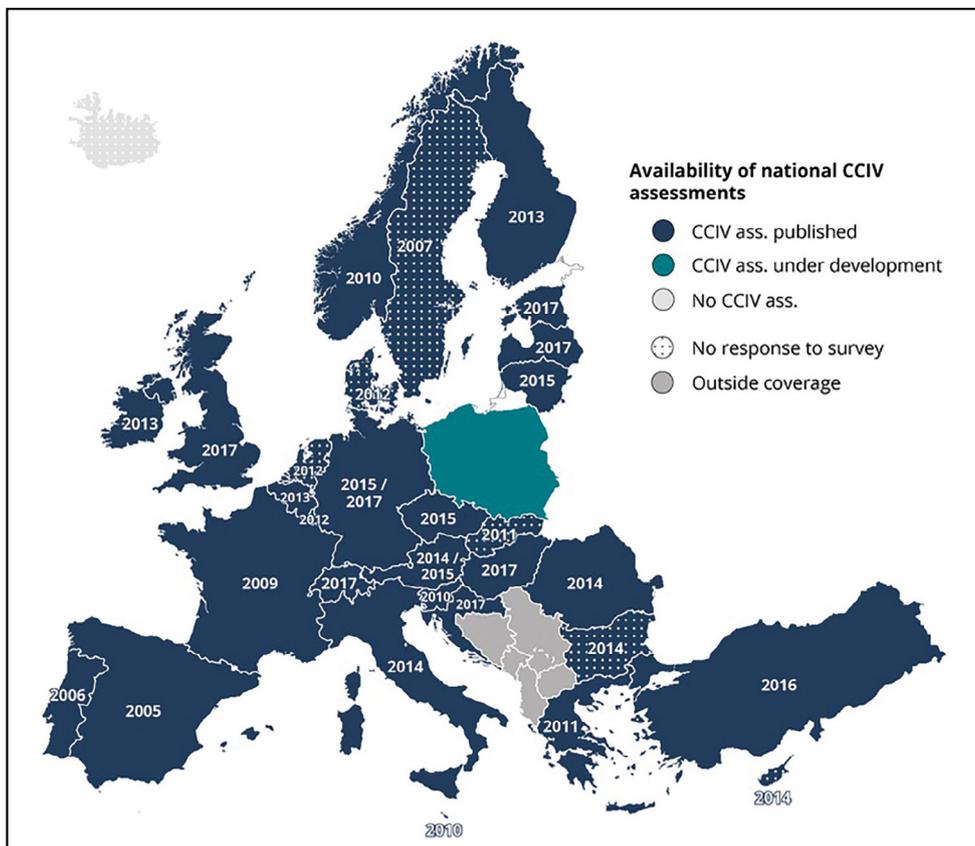
armonizarse, teniendo una visión global del problema y la información debe llegar hasta el nivel local. Del interesante conjunto de datos que presenta se han tomado tres. Uno de ellos es el cronograma español para el estudio de impactos, vulnerabilidad y riesgos asociados al cambio climático (CCIV en siglas inglesas), figura 5. Otro es el mapa con el estado de políticas nacionales de adaptación (figura 6). Y el

último es un mapa de disponibilidad para la evaluación de las naciones de CCIV (figura 7), en el que se puede observar que la respuesta española es la más temprana.

Todas estas publicaciones nos dan las herramientas básicas para conocer los procesos que gobiernan la respuesta de la costa a las variaciones del nivel del mar y las políticas que contemplan esa realidad.



**Figura 6.** Estado de las nacionales de adaptación (Fuente: European Environment Agency).



**Figura 7.** Disponibilidad de la valoración nacional de CCIV (Fuente: European Environment Agency).

Antes de adentrarnos en conocer cómo y en qué forma pueden afectar a la costa los cambios del nivel del mar, debemos saber por qué cambia, cuales son las causas que hacen que el nivel medio del mar varíe sin tener en cuenta las oscilaciones que de manera natural se ve afectada la superficie del mar. Para ello, se va a seguir la metodología que propone el maravilloso trabajo de Fairbridge (1961), que por ser “antiguo” no deja de estar de plena actualidad, que usó como estudio esencial Per Bruun (1962) cuando enunció su famosa “Regla de Bruun” que es la herramienta esencial que tenemos para conocer cómo puede evolucionar una costa tras la subida del nivel del agua.

### 3. CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR

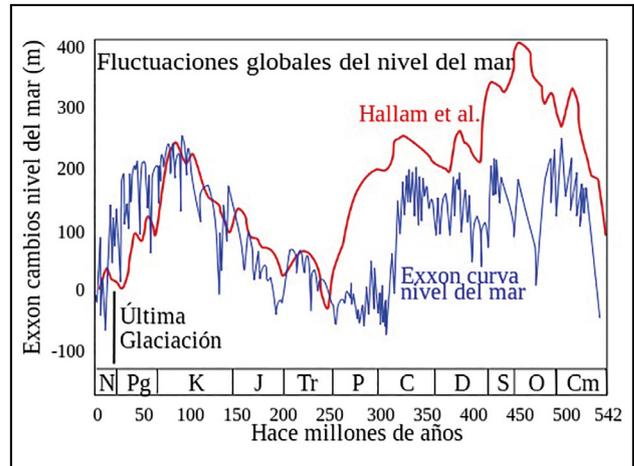
El nivel del mar ha estado oscilando continuamente a lo largo del tiempo. Estos cambios o variaciones del nivel del mar respecto a la tierra se conocen como eustáticos. Como escribe Fairbridge (1961): “Cambios en los niveles del mar los ha observado el hombre desde la antigüedad más temprana y la literatura 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.

Siguiendo, de nuevo, a Fairbridge (1961), son cuatro las hipótesis teóricas, no excluyentes, que intentan explicar el desplazamiento de la línea de costa:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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. Del conjunto de cambios climáticos destaca la alternancia de las glaciaciones e interglaciaciones; en las primeras, el agua congelada se acumula en los continentes, reduciéndose el agua líquida en las cuencas oceánicas, lo que provoca un descenso del nivel del mar en el periodo glacial. El aumento de temperatura en

periodos interglaciares provoca el efecto contrario, elevándose el nivel del mar y, en mucha menor medida, los continentes al reducirse el peso de las masas de hielo sobre ellos.



**Figura 8.** Fluctuaciones del nivel del mar desde hace 542 millones de años, según dos estudios, los de Hallam et al. (1983) y Exxon (Haq et al. 1987, Ross & Ross 1987 y 1988). N = Neógeno Pg = Paleógeno K = Cretácico J = Jurásico Tr = Triásico P = Pérmico C = Carbonífero D = Devónico S = Silúrico O = Ordovícico Cm = Cámbrico (Fuente: Phanerozoic Sea Level.pn y Wikipedia).

2. Termo eustatismo: Se produce debido a los cambios de la densidad del agua del mar debido a los cambios de su temperatura. Así, por ejemplo: si la temperatura del agua pasase de 0° a 4° (con una salinidad del 3,5%) la densidad cambiaría de 1,02778 a 1,02811. Con estos datos, suponiendo un volumen total de agua de los océanos de 1370.10<sup>6</sup> km<sup>3</sup> y una superficie de 360 .10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> (Fairbridge 1961, Bruun 1962) se obtendría una bajada del nivel del mar de 1,22 m. A partir de 4°, la densidad disminuye y, por tanto, el nivel del mar subiría proporcionalmente a su densidad.
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 eustatismo: 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 de más amplia aplicación es la

Hipótesis eustática. En todo caso, aunque nos centremos sólo en una de las hipótesis y causas, se debe tener siempre presente el resto de los factores a la hora de hacer una evolución, tal como dice Fairbridge (1961).

Junto con la hipótesis eustática, hay que tener en cuenta también los distintos tipos de 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 tener en cuenta también que dentro de estos factores se encuentra el “cambio climático” producido por la actividad humana, que de alguna manera “activa” los factores que producen el eustatismo. Hay que tener en cuenta que los cambios en el nivel del mar respecto de la tierra se vienen observando, y midiendo desde hace años, aunque en los primeros tiempos solamente se hizo de manera parcial o regional, a ellos se dedica el apartado siguiente.

#### 4. PREDICIONES DE CAMBIOS DEL NIVEL DEL MAR

La detección del incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático no es nueva. En el trabajo de Dean (1991), con el mismo nombre de este apartado, comienza diciendo: “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...”. En él se hace referencia a diversos datos que determinaban el incremento del nivel del mar, todo ellos locales, en las costas americanas; estos datos indican a las claras que este problema ya se había detectado en el pasado reciente. La tabla 1, 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 Méjico	2,7	3,0
Costa oeste	3,0	1,3
Costa de Florida	2,2	1,3

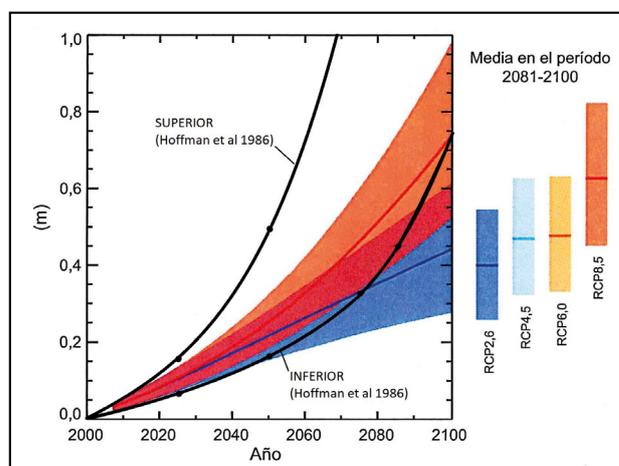
También nos presenta las predicciones que entonces había recopilado el gobierno americano (National Research Council 1987) de diversos estudios de Hoffman et al (1983), cuyo resumen se presenta en la tabla 2.

**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 et al. (1986)					
Inferior	3,5	10	20	36	44
Superior	5,5	21	55	191	258
Hoffman et al. (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 Quinto Informe (Volumen II del Quinto Informe de Evaluación relativo a Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad frente al cambio climático - AR5), para ello se ha incorporado las estimaciones extremales de Hoffman de 1986 que aparecen en la tabla 2, en la gráfica de estimación de subida del nivel del mar que contiene el Quinto Informe (figura 9). Como puede apreciarse, las previsiones actuales son inferiores a las que aparecían en los primeros tiempos (Dean, 1991), si bien parece que se refiere a las costas de EE.UU., mientras que las previsiones actuales son globales. 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. Dean (1991) muestra datos tomados en EE.UU. de las variación 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.

Las predicciones actuales vienen determinadas en el citado 5º Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC en sus siglas inglesas) - AR5, que se resume en la gráfica de la figura 9. Según este gráfico, la subida del nivel del mar se estima entre 0,25 m y 1,0 m en el año 2100, siendo las previsiones de entre 0,15 m y 0,32 m para el año 2050 para los cuatro nuevos escenarios de emisiones (RCP) que contemplaron.



**Figura 9.** Gráfica de la tendencia de crecimiento prevista del nivel del mar del Quinto Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el que se han incluido las previsiones de subida de las costas de EE.UU. según los datos de Hoffman de 1986.

Las predicciones han ido cambiando en los diferentes informes del IPCC, cuyas ediciones fueron: 1<sup>er</sup> Informe (1990), 2<sup>o</sup> Informe (1995), 3<sup>er</sup> Informe (2001), 4<sup>o</sup> Informe (2007) y 5<sup>o</sup> Informe (2014). Así, por ejemplo, las medidas dadas por el 3<sup>er</sup> IPCC (2001) para el siglo XX indicaban una tasa de elevación entre 1 y 2 mm/año; aunque esta velocidad de subida es considerada baja por algunos autores, pudiendo alcanzar hasta 4 mm/año, según el trabajo de Dangendorf et al. (2017).

### 5. MODELOS DE RESPUESTA DE LA LÍNEA DE COSTA

Ante la subida del nivel del mar, se han considerado los siguientes tres modelos que nos permiten conocer cómo va ser la respuesta de la línea de costa y el perfil de playa:

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

Estos modelos consideran que la respuesta del perfil de playa frente al cambio del nivel del mar únicamente es debida a la variación del transporte transversal de sedimentos. Esta respuesta tendría que ser complementada con otros cálculos que tengan en cuenta las previsiones de la variación de la dirección del flujo medio de energía y transporte potencial de sedimentos que se produciría como consecuencia del cambio climático.

#### 5.1. La regla de Bruun (1962)

Uno de los grandes temas de interés de los ingenieros costeros consiste en analizar la relación entre un aumento de nivel del mar y la respuesta del perfil de la playa. En el año 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.

Bruun, al estimar la erosión a largo término 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. Por tanto, se considera que la costa está en equilibrio cuantitativo, es decir, la misma cantidad de material que entra es la que sale. Se supone que con la elevación del agua se produce una erosión ( $\Delta X$ ) y que 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 10.

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

El volumen de arena por unidad de longitud, AB, se obtiene por la erosión del perfil. El retroceso de la orilla  $\Delta X$  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:

$$AB = \Delta X (h + d) \tag{1}$$

o despejando  $\Delta X$ ,

$$\Delta X = \frac{AB}{(h + d)} \tag{2}$$

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

$$\Delta X = \frac{AB}{(h + d)} = \frac{A}{\tan \theta} \tag{3}$$

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

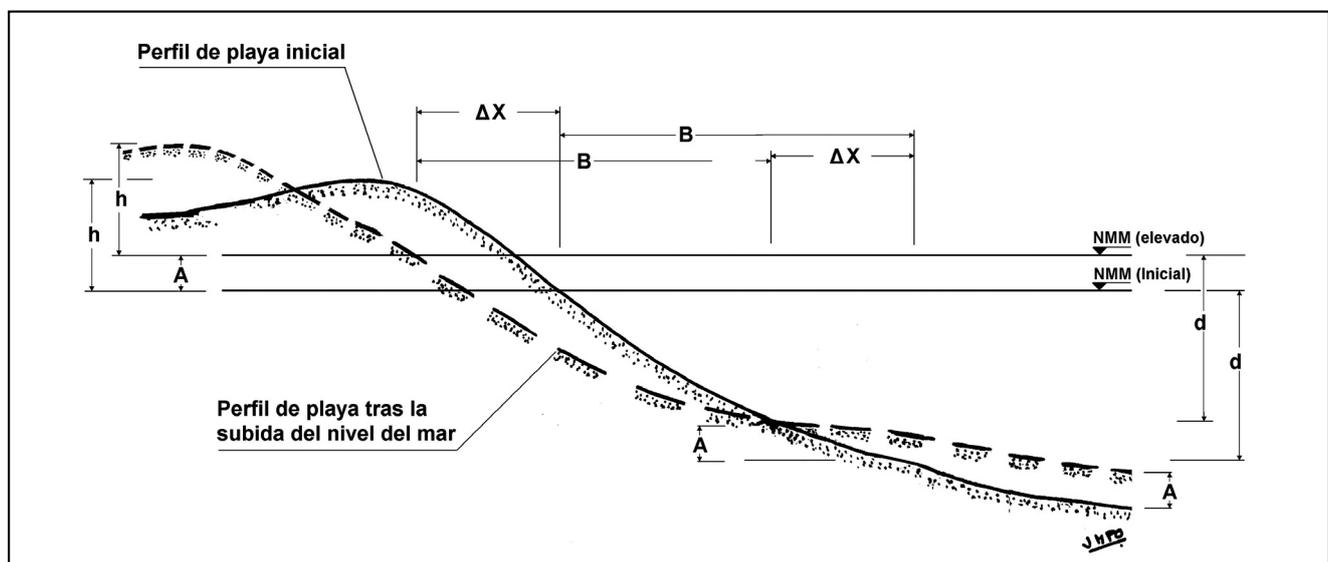
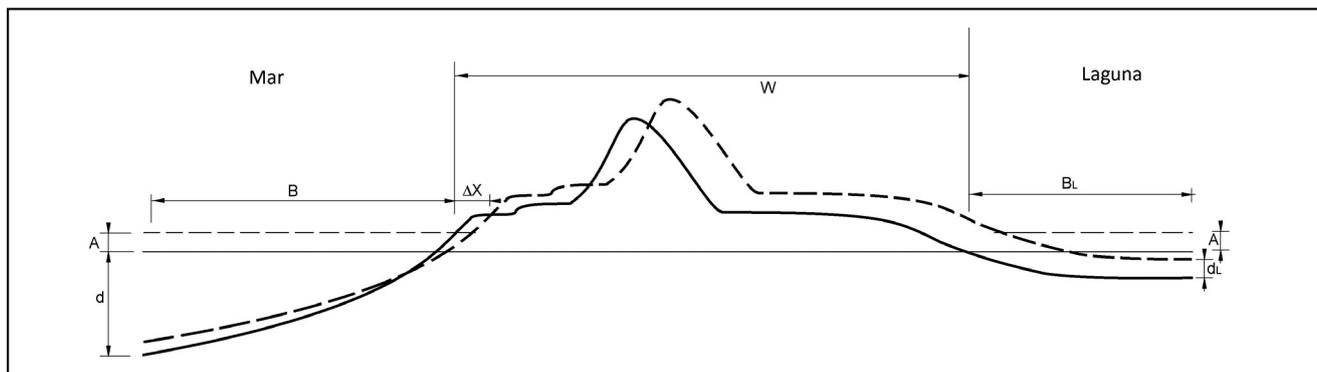


Figura 10. Regla de Bruun, variables.



**Figura 11.** Aplicación de la Regla de Bruun para el caso de una playa barrera de una laguna litoral según Dean y Maurmeyer (1983).

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:

$$y = C x^n \tag{4}$$

El retroceso de la costa  $\Delta X$  ante una elevación  $A$  del nivel del mar, sería:

$$\Delta X = \frac{A \left(\frac{d}{C}\right)^{\frac{1}{n}}}{(h + d)} \tag{5}$$

O si el perfil es del tipo exponencial:

$$y - y_0 = D e^{-\alpha x} \tag{6}$$

En este caso, el retroceso de la costa  $\Delta X$  ante una elevación  $A$  del nivel del mar, sería:

$$\Delta X = \frac{A - \frac{\ln\left(1 - \frac{y_0}{D}\right)}{\alpha}}{(h + d)} \tag{7}$$

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), para una playa barrera con una laguna litoral, figura 11, siendo el retroceso de la costa  $\Delta X$  ante una elevación  $A$  del nivel del mar:

$$\Delta X = A \frac{(B_L + W + B)}{(d + d_L)} \tag{8}$$

### 5.2. Dean (1987)

Este método de Dean para determinar el movimiento de la línea de costa se basa en los principios o premisas de la Regla de Bruun. El método tiene en cuenta la variabilidad natural del oleaje y del sedimento, y también considera la posibilidad que este último tenga un movimiento hacia la costa. Considera tres características: 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 considera 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, y 2) La partícula se mueve hacia tierra hacia una profundidad menor. La ecuación que gobierna este proceso es:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{dA}{dt} = \frac{\partial Q_s}{\partial x} + \text{fuente} + \text{efeto de suspensión} \tag{9}$$

### 5.3. Kriebel y Dean (1993)

Presentaron un método analítico simple apropiado para cálculos preliminares de erosión, en dunas y playas y debido a temporales costeros importantes. Lo llamaron el Método de Circunvolución, y muestra 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 que las playas sometidas a condiciones de fuerzas de erosión continuas responden 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:

$$R(t) = \frac{R_\infty}{T_s} \int_0^t f(t) e^{-\frac{(t-\tau)}{T_s}} d\tau \tag{10}$$

Donde (figura 12):  $R_\infty$  = 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.  $r$  = tiempo de demora

La ecuación anterior sugiere que la respuesta del perfil de playa se retrasará respecto a las fuerzas erosivas y se reducirá respecto a la máxima erosión potencial.

Los autores consideraron la respuesta de la playa para una idealizada subida del nivel del mar por temporal del siguiente tipo:

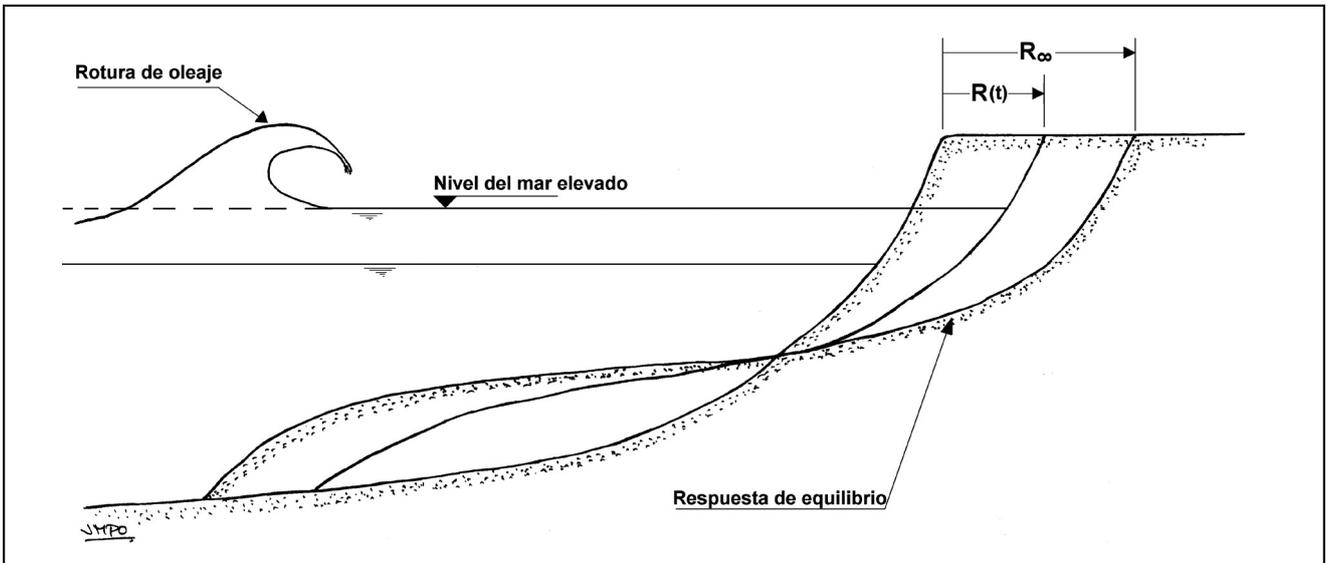


Figura 12. Definición de la respuesta del perfil de playa (Kriebel y Dean 1993).

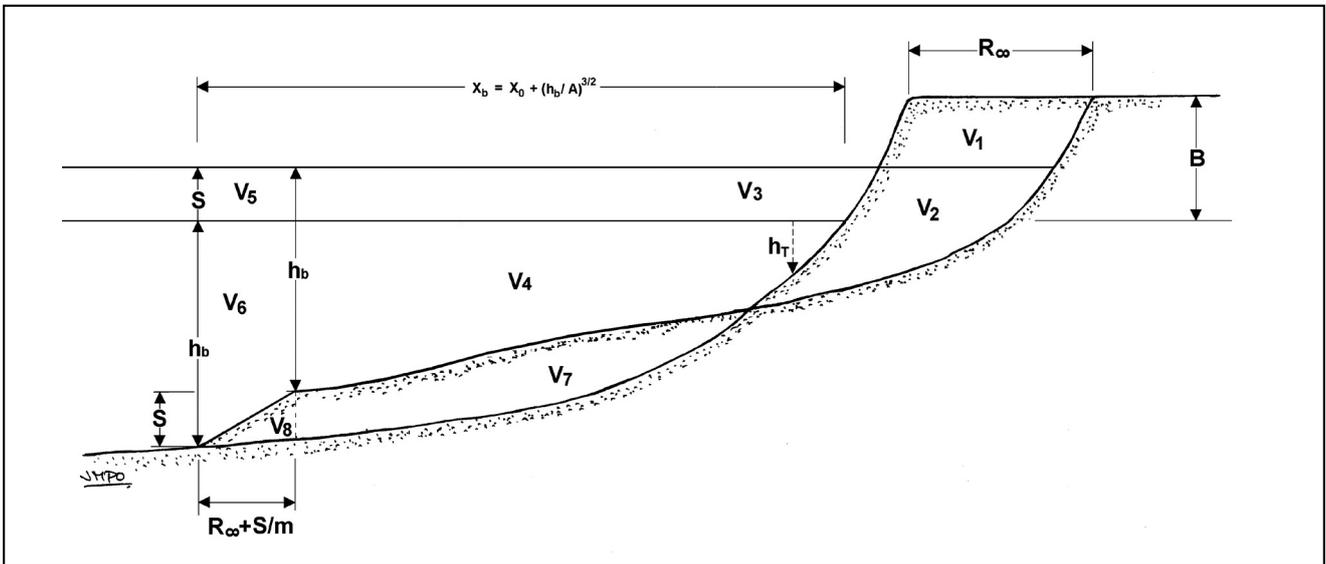


Figura 13. Esquema de modificación de un perfil con berma en pendiente para un temporal con una sobreelevación, set-up,  $S$  (Kriebel y Dean, 1993).

$$f(t) = \text{sen}^2(\sigma t) , \text{ para } 0 < t < T_D \quad [11]$$

$$x = \frac{h}{m} \text{ si } h < h_T \quad [14]$$

Siendo  $T_D$  la duración total de la subida y bajada del nivel del mar por el temporal, que para el caso que nos ocupa, 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:

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad [12]$$

Como con la berma en pendiente:

$$x = x_0 + \left(\frac{h}{A}\right)^{\frac{3}{2}} , \text{ si } h > h_T \quad [13]$$

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 13).

El retroceso de la línea de agua hacia la tierra que se produce en la playa, debido a la sobreelevación y cambio de perfil correspondiente vendría dado por:

$$R_{\infty} = \frac{S \left( x_b - \frac{h_b}{m} \right)}{B + h_b - \frac{S}{2}} \quad [15]$$

Con:

$$x_b = x_0 + \left(\frac{h_b}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad [16]$$

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,  $R_\infty$  = 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.

## 6. APLICACIÓN AL CASO DE LAS COSTAS ESPAÑOLAS

El CEDEX lleva colaborando más de cinco años con la DGSCM para elaborar diversas Estrategias de Actuación en la costa española, un conjunto de planes para realizar actuaciones y obras costeras, de manera ordenada y global, de grandes tramos de la costa.

Las Estrategias de Actuación que se ha realizado hasta la fecha son:

- Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir (año 2013).
- Estrategia de actuación en el Maresme (año 2014).
- Estrategia de actuación del tramo de costa comprendido entre el puerto de Castellón y el puerto de Sagunto (Castellón sur) (año 2015).
- Estrategia de actuación en la costa sur de Valencia (puerto de Valencia – puerto de Denia) (año 2015).
- Estrategia de actuación en la c osta de Granada (2017).

Todos los informes correspondientes a estas estrategias se pueden consultar en la página web del Ministerio para la Transición Ecológica. Cabe mencionar también que en la actualidad se está llevando a cabo la correspondiente al Mar Menor (Murcia).

En estas estrategias se incluye un capítulo dedicado al “Efecto del Cambio Climático” en el que se incluye un apartado que trata la “Estrategia de adaptación” y otro a la “Respuesta de la costa y valores medios”. En este último apartado, se aplica la ya mencionada regla de Bruun para determinar el alcance teórico del mar por su subida debido al efecto invernadero en distintas playas de la costa, usándose para ello la profundidad de cierre determinada en un estudio previo realizado por el CEDEX para la DGSCM (Peña y Antón 2012).

Como ejemplo de estos trabajos, en las líneas siguientes se muestra el resultado de la última de las Estrategias realizadas, correspondiente a las costas de Granada, donde se determinó el retroceso teórico de la costa en ocho playas, suponiendo para su cálculo una longitud de berma infinita. Para ello se aplicó de manera sencilla la expresión

de la regla de Bruun (1962), tomando como profundidad de cierre a largo término, el valor obtenido para la playa de Torrenueva (Motril) en el informe del CEDEX (Peña y Antón 2012), que era de 11,6 m. Suponiendo una profundidad de cierre a largo término similar en las playas consideradas (figura 14): La Herradura, Velilla, La Guardia, Granada, Las Azucenas, Sotillo, La Mamola y El Pozuelo, se determinó el avance de la línea de orilla o pérdida de anchura de playa, máxima para los años 2050 y 2100 (tabla 3).

Para la subida del nivel del mar  $A$  (m), se tomaron los valores extremos de subida del nivel del mar previstos por el IPCC (2004), figura 9 (0,32 m en el año 2050 y 1,0 m en el año 2100). En la tabla,  $B$  (m) es la distancia a dicha profundidad, para cada una de las playas. Para el año 2100 se consideró un valor de la subida del nivel del mar de 0,9 m, para quedar del lado de la seguridad dado que el valor medio de la banda es de 0,75 m.

Teniendo en cuenta los datos de las variables indicadas y de la aplicación de la regla de Bruun (1962), se determinó, el avance teórico de la línea de orilla  $\Delta X$  en cada una de las playas, para los años horizonte 2050 y 2100.

**Tabla 3.** Retrocesos Máximos por playa (CEDEX 2017)

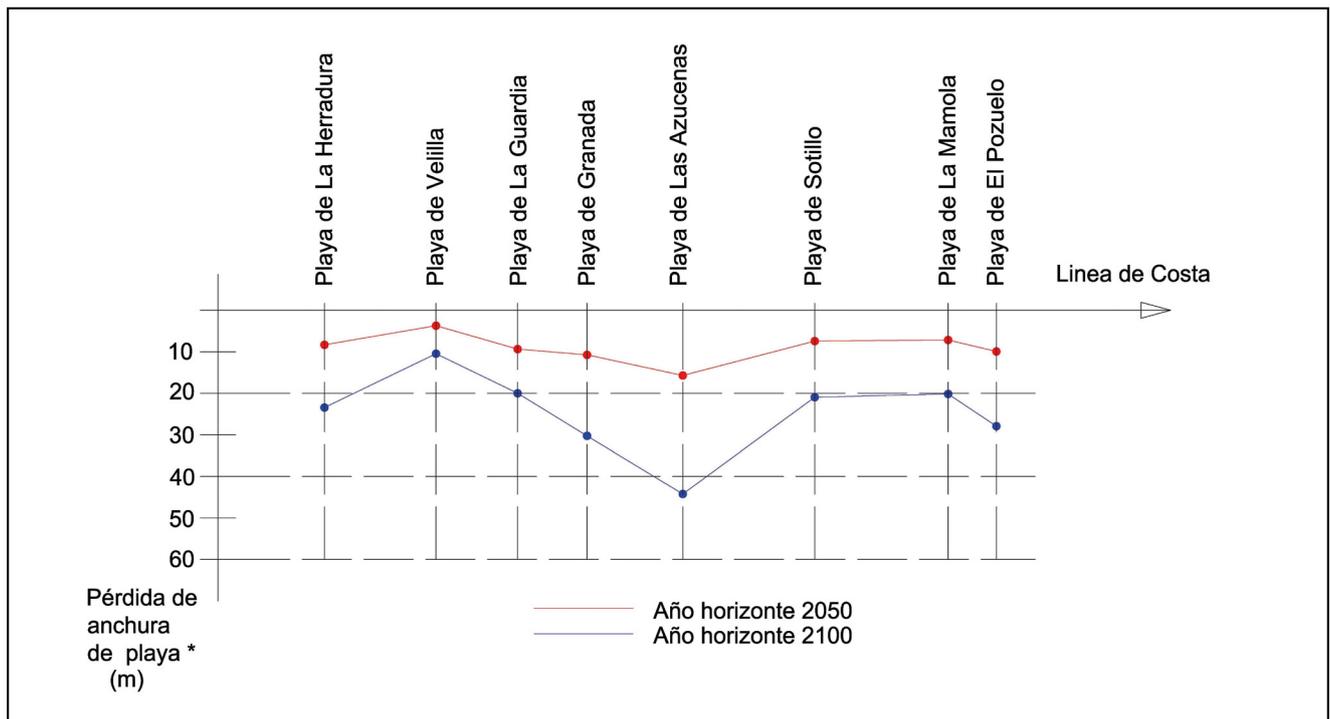
Playa	A(m)	B(m)	2050	2100
			$\Delta X$ (m)	$\Delta X$ (m)
La Herradura	0,32	302	8,33	23,43
Velilla	0,32	135	3,72	10,47
La Guardia	0,32	340	9,37	26,38
Granada	0,32	390	10,75	30,26
Las Azucenas	0,32	570	15,72	44,22
Sotillo	0,32	270	7,44	20,95
La Mamola	0,32	260	7,17	20,17
El Pozuelo	0,32	360	9,93	27,93

Por lo tanto, el retroceso aproximado de playa que resultó de aplicar la regla de Bruun (1962), con las previsiones de subida del nivel del mar indicadas anteriormente, daría un valor máximo de 15 m para el horizonte de 2050 y de 44 m para el horizonte 2100. Este retroceso, aproximado, se obtuvo suponiendo una anchura suficiente de playa, sin tener en cuenta la condición de borde, por ejemplo muros, acantilados, etc., que reducirían ese alcance. En la figura 15 se representa este retroceso aproximado de la línea de orilla, para las playas y años indicados.

Tal como se mencionaba en la introducción del apartado 5, estos resultados deben ser completados con otros cálculos que tengan en cuenta las previsiones de variación de la dirección del flujo medio de energía y transporte potencial de sedimentos que se produciría como consecuencia del cambio climático. Para ello, en España se puede recurrir a los datos que presenta el proyecto C3E ([www.c3e.ihcantabria.com](http://www.c3e.ihcantabria.com)) Universidad de Cantabria, 2004) para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar: “Impactos en la costa española por efecto del cambio climático”, donde se aprecia que: 1) La variación del flujo medio de energía provocará en las costas de Granada un retroceso en la línea de orilla; 2) El transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa se reducirá en un porcentaje importante.



**Figura 14.** Situación de las playas de Granada donde se determinó el avance teórico del mar debido al cambio climático usando la Regla de Bruun (Foto: Google Earth).



**Figura 15.** Retroceso aproximado de la línea de orilla en las playas de Granada, para el año horizonte 2050 y 2100 (CEDEX 2017).

El retroceso máximo esperado para el año 2050, en la que se consideró que la variación de la dirección del flujo medio de energía corresponde a la variación media calculada para una playa de 1000 m de longitud, aplicando la ley de Snell para calcular la variación del flujo medio a 10 m de profundidad.

Las playas situadas en la costa sur de la península Ibérica, no son excesivamente susceptibles a este tipo de retroceso, siendo las más afectadas las playas de Granada y Almería, sobre todo a las de Granada, pudiendo alcanzar un retroceso de hasta 40 m. En el tramo de costa en estudio, son pocas las zonas donde se alcanzan los mayores retrocesos.

Se ha comprobado que el retroceso será mayor cuanto mayor sea la altura de ola significativa que es excedida en la playa y cuanto menor sea el tamaño de grano que compone la misma. Así en el Mediterráneo, la altura de ola superada 12 horas al año es menor que en el Cantábrico. Dado que el retroceso en este caso es proporcional a la raíz cuadrada del  $H_{s12}$ , Estimándose que el retroceso máximo en la costa Mediterránea es menor, del orden de 15 m aproximadamente.

Otro efecto significativo es el posible cambio en el transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa, típico de las playas de la zona Mediterránea, sometidas

a un transporte litoral muy activo. Demostrándose que el cambio en la tasa de transporte puede ser consecuencia de variaciones en la altura de ola en rotura y en la dirección del oleaje en rotura.

Los efectos esperables del cambio climático sobre las playas se consideran como erosiones paulatinas a largo y medio plazo y se incluyen dentro de las partidas de mantenimiento de las playas que deben realizarse con periodicidad. Debiendo tener un control periódico de los cambios que se producen en las playas incluido el provocado por este efecto en los seguimientos de ellas.

## 7. CONCLUSIONES

El efecto invernadero debido al cambio climático y la subida del nivel del mar asociada se conoce y se ha estudiado desde hace décadas. Para distinguir qué parte de subida es debido a estos efectos, se debe conocer cuáles son las variables que pueden hacer variar el nivel del mar (Fairbridge 1961).

Las proyecciones actuales de subida del nivel del mar vienen determinadas por los resultados del 5º Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC) – AR5, figura 9, estimándose entre 0,15 y 0,32 m en el año 2050 y entre 0,25 m y 1,0 m en el año 2100, para los cuatro escenarios de emisiones (RCP) considerados.

La costa es un elemento activo que reaccionará ante los efectos que provoca el cambio climático. Existen modelos de respuesta sencillos que nos aproximan a conocer cómo va responder la costa a esta subida (Regla de Bruun 1962, Dean 1987, Kriebel y Dean 1993)

Los efectos esperables del cambio climático sobre las playas se consideran como erosiones paulatinas a largo y medio plazo. Estas variaciones deberían incluirse dentro de las partidas de mantenimiento de las playas que deben realizarse con periodicidad para adaptarse al nuevo escenario del nivel del mar en cada momento. Para ello, se considera imprescindible realizar un control periódico de los cambios que se producen en las playas de nuestra costa, que permitirá detectar las variaciones debidas a la subida del nivel del mar.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Ávila, A., Santiago, J.M., Baquerizo, A., y Losada, M.A. (2007). Modelo de respuesta de la línea de costa a la evolución eustática del nivel del mar. *Actas de las IX Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, San Sebastián*, pp. 621-626.

Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*. American Society of Civil Engineers, 88(1): pp. 117-132.

Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Clinton, P.C., Frederikse, T., y Riva, R. (2017). Reassessment of 20th century global mean sea level rise. *PNAS* June 6, 2017. 114(23): pp. 5946-5951.

Dean, R.G. (1987). Additional sediment transport input to nearshore region. *Shore and Beach*, Special Issue Dedicated to M.P. O'Brien, 55(3-4): pp. 76-81.

Dean, R.G., y Maurmeyer, E.M. (1983). Model for beach profile response. En: *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press (capítulo 4, pp. 151-166).

Dean, R.G. (1991). Beach response to Sea Level Rise. En: *The Sea*. LeMéhauté, B., y Hanes, D. (eds.), Ocean Engineering Science (vol. 9, parte B). J. Wiley & Sons.

Dean, R.G., y Dalrymple, R.A. (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.

Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (2015). *Estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (2015). *Estudio ambiental estratégico para la evaluación ambiental de la estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Edelman, T. (1972). Dune erosion during storm conditions. *Proceedings 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1970, pp. 1305-1312.

European Environment Agency (2018). *National Climate Change Vulnerability and Risk Assessment in Europe, 2018*. Publications Office of the European Union.

Fairbridge, R.W. (1961). Eustatic changes in the sea level. En: *Physics and Chemistry of the Earth*. Pergamon Press (vol. 4, pp. 99-185).

Grupo e Ingeniería Oceanográfica y de Costas (1998). *Atlas de Inundación del Litoral Español*. Universidad de Cantabria y Ministerio de Medio Ambiente.

Hoffman, J.S., Keyes, D., y Titus, J.G. (1983). *Projecting future sea level rise: methodologies, estimates to the year 2100, and research needs*. Washington DC: US Environmental Protection Agency.

IPCC -Panel Intergubernamental del Cambio Climático (2014). *Quinto Informe de Evaluación*. Volumen II. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Kriebel, D.L., y Dean, R.G. (1993). Convolution method for time-dependant beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. American Society of Civil Engineers, 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*.

National Research Council (1987). *Responding to changes in sea level: engineering implications*. Washington DC: National Academy Press.

Oficina Española de Cambio Climático -OECC- (2005). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.

Peña Olivas, J.M., y Antón Camacho, A. (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 (nº 22-410-5-001, informe técnico para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar). Madrid: CEDEX.

Universidad de Cantabria (2004). *Impactos en la costa española por efecto del cambio climático: Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española; Fase II. Evolución de efectos en la costa española; Fase III. Estrategias frente al cambio climático en la costa*. Universidad de Cantabria en colaboración con la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar.

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 Technical Aid N° 79-2).