

# La subida del nivel del mar y la erosión de la costa

ANTONIO LECHUGA ÁLVARO (\*)

**RESUMEN** En el presente artículo se estudia con cierto detalle el retroceso de la línea de orilla que se produciría para una determinada subida del nivel del mar siguiendo la hipótesis de Bruun. Se avanzan así mismo las principales conclusiones del panel intergubernamental IPCC y finalmente se aplican los resultados del análisis a tres localizaciones de nuestro litoral.

## SEA LEVEL RISE AND COASTAL EROSION

**ABSTRACT** We study in this paper to a certain extent the receding of the shoreline that would happen whether sea level rises, following Bruun's hypothesis. At the same time we consider the main conclusions of the intergovernment Panel IPCC and finally we use the result to three locations on our coastal area.

**Palabras clave:** Subida del Nivel del Mar; Erosión; Playa.

## 1. INTRODUCCIÓN

En toda la literatura técnica y en algunos medios no especializados se llama la atención sobre el hecho de que una subida del nivel del mar tiene unas consecuencias directas sobre la erosión costera. En un ya famoso artículo del año 1962, Per Bruun enfatizó la importancia de la pérdida de playa por esta circunstancia. El mecanismo según este investigador estaba claro: Ante una subida del nivel del mar el perfil de equilibrio de las playas tendería a reaccionar tratando de recuperar la profundidad inicial mediante un desplazamiento del sedimento de la línea de orilla hacia los fondos lo cual induciría un retroceso de la playa seca. La magnitud de este retroceso vendría marcada por una igualdad de volumen de sedimento supuesto que no hubiese variación en el sentido longitudinal. Al día de hoy las consideraciones sobre este proceso siguen siendo válidas variando solo el cómputo del balance de volúmenes. En esta contribución trataremos de profundizar en estas consideraciones proponiendo una metodología aplicable a la costa española.

## 2. MODELO DE EROSION

En la mayor parte de los casos el modelo de erosión se fundamenta en el llamado perfil de equilibrio que como sabemos tiene la expresión:

$$h = A \cdot x^{2/3}$$

donde h es la profundidad, x distancia horizontal y A, el llamado parámetro de Dean dependiente del tamaño del se-

dimento. El modelo supone que la nueva distribución del sedimento por el fondo se produce hasta la llamada profundidad activa.

La diferencia de áreas entre el perfil antes y después de la subida del nivel del mar marca unas relaciones entre las distintas variables implicadas que esencialmente son las siguientes: Subida del nivel, retroceso de la playa, punto de corte de los dos perfiles (distancia horizontal y profundidad) y profundidad activa con su correspondiente distancia a la línea de orilla. Los cálculos son algo engorrosos ya que, a pesar de la simplicidad del perfil de equilibrio los cambios de eje aumentan el número de sumandos. Una simplificación generalmente aceptada y válida para la mayoría de los casos es que la relación entre la subida de nivel, S, y el retroceso, r, es igual

$$\frac{S}{r} = \frac{da}{Xa}, \quad r = S \cdot \frac{Xa}{da}$$

al cociente entre la profundidad activa, da, y su distancia a la línea de orilla xa, por tanto.

A continuación vamos a efectuar el desarrollo por volúmenes con cierto detenimiento.

Partiendo de las consideraciones del modelo de erosión de Bruun pero efectuando el cálculo de volúmenes con todos los términos implicados (vease gráfico) obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$y = AX^{2/3}$$

es la ecuación básica en los ejes iniciales (x,y) antes de la subida de nivel, n.

Llamando B al punto de corte entre perfiles obtendremos:

$$X_B \\ y_B = AX_B^{2/3}$$

(\*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Jefe del Área de Costas del CEDEX.

Efectuando la correspondiente traslación de ejes (X, Y).

$$\begin{aligned} X &= x + m + x_0 \\ Y &= y + n \end{aligned}$$

Y suponiendo que las características del perfil son las mismas que las iniciales

$$Y = A \cdot X^{2/3}$$

y en los ejes antiguos

$$y + n = A(x + m + x_0)^{2/3}$$

El punto de corte se obtendría resolviendo la ecuación en,  $X_B$  en función de m y n,

$$Ax_B^{2/3} + n = A(x_B + m + x_0)^{2/3}$$

Supuesto conocido  $X_B$  las cuatro integrales implicadas en la igualdad de volúmenes son las siguientes:

Volumen 1:

$$I_1 = \int_0^{X_B} Ax^{2/3} dx = \frac{3}{5} A x_B^{5/3}$$

Volumen 2:

$$I_2 = \int_0^{x_B+m+x_0} A X^{2/3} dx = \frac{3}{5} A(x_B + m + x_0)^{5/3}$$

Volumen 3:

$$I_3 = nx_B + \frac{3}{5} A x_0^{5/3}$$

Por, tanto el volumen de control en la playa emergida será:

$$V_C = \frac{3}{5} A(x_B + m + x_0)^{5/3} - \frac{3}{5} A x_B^{5/3} - n x_B - \frac{3}{5} A x_0^{5/3}$$

Volumen 4:

$$I_4 = \int_{x_B}^L A X^{2/3} dx = \frac{3}{5} A[L^{5/3} - x_B^{5/3}]$$

Volumen 5:

$$I_5 = \int_{x_B+m+x_0}^{L+m+x_0} AX^{2/3} dx = \frac{3}{5} A[X^{5/3}]_{x_B+m+x_0}^{L+m+x_0}$$

El volumen del control sumergido valdrá por tanto

$$\begin{aligned} V_{c1} &= I_4 - I_5 + (L - x_B)n \\ &= \frac{3}{5} A[L^{5/3} - x_B^{5/3}] - \frac{3}{5} A[L^{5/3} - (x_B + m + x_0)^{5/3}] + \\ &\quad + (L - x_B)n \end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores L y  $x_0$  son conocidas en función de la profundidad activa, hc y la subida del nivel, n, respectivamente,

$$hc = A \cdot L^{2/3}, L = \left(\frac{hc}{A}\right)^{3/2}$$

$$n = A \cdot x_0^{2/3}, x_0 = \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2}$$

Igualando los volúmenes de control,

$$V_C = V_{c1}$$

Obtenemos:

$$\frac{3}{5} A(x_B + m + x_0)^{5/3} - \frac{3}{5} A x_B^{5/3} - \frac{3}{5} A x_0^{5/3} = \frac{3}{5} A(L^{5/3} - x_B^{5/3})$$

$$- \frac{3}{5} A[(L + m + x_0)^{5/3} - (x_B + m + x_0)^{5/3}] + Ln$$

que después de las oportunas simplificaciones podemos escribir como

$$\frac{3}{5} A L^{5/3} + L \cdot n + \frac{3}{5} A x_0^{5/3} - \frac{3}{5} A(L + m + x_0)^{5/3} = 0$$

Esta es una fórmula exacta que relaciona el retroceso **m**, con la subida de nivel, **n** para el modelo de erosión adoptado.

Si suponemos  $x_0$  pequeña y a su vez m pequeña respecto a L obtenemos en primera aproximación:

$$m = \frac{n}{hc} \cdot L$$

que es la conocida regla Bruun.

Como vemos la profundidad límite, **hc** es un parámetro importante para la formulación de la erosión costera provocada por la subida del nivel del mar. Estudios sobre esta profundidad límite se desarrollan en todo el mundo, ya que aspectos esenciales de la dinámica litoral, aparte del citado dependen así mismo de este parámetro.

Similar tratamiento de volúmenes fue llevado a cabo por Dean y otros con resultados parecidos.

### 3. SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR Y CAMBIO CLIMÁTICO

El retroceso de la playa provocado por una subida del nivel del mar es un tema que no admite discusión y en el que hay acuerdo prácticamente total en las investigaciones. Otra cosa muy distinta es lo que ocurre con la anunciada subida del nivel del mar y sus causas. En este punto las disparidades son notables a nuestro juicio por dos razones puntuales:

- 1) La propia medición del nivel medio de mar y sus medias temporales es un proceso relativamente complejo, que exige en primer lugar series largas de mediciones y un tratamiento estadístico bastante cuidadoso, teniendo en cuenta que la variación interanual supera en un orden de magnitud la posible tendencia a largo término.

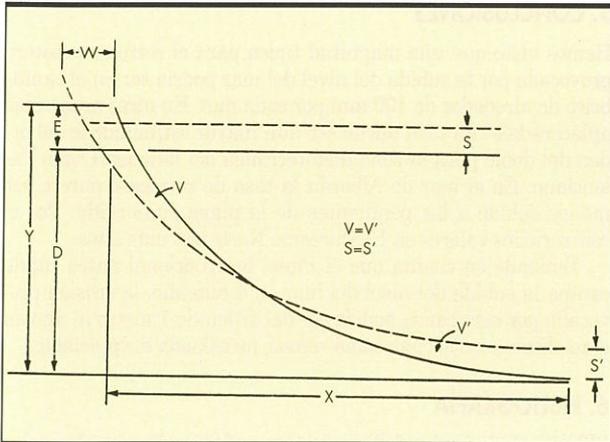


FIGURA 1. Igualdad de volúmenes en la hipótesis de Bruun

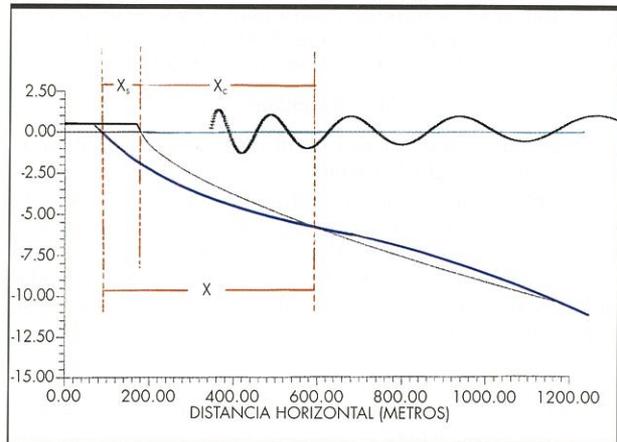


FIGURA 2. Retroceso de la línea de orilla ante el oleaje. Punto C (pivote)

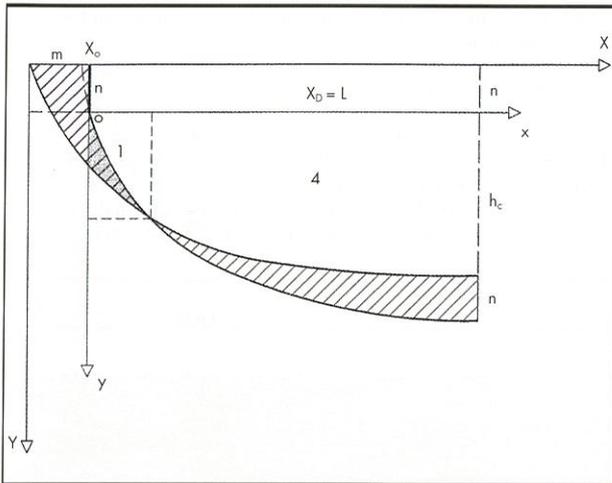


FIGURA 3. Cálculo de volúmenes antes y después de la subida del nivel del mar

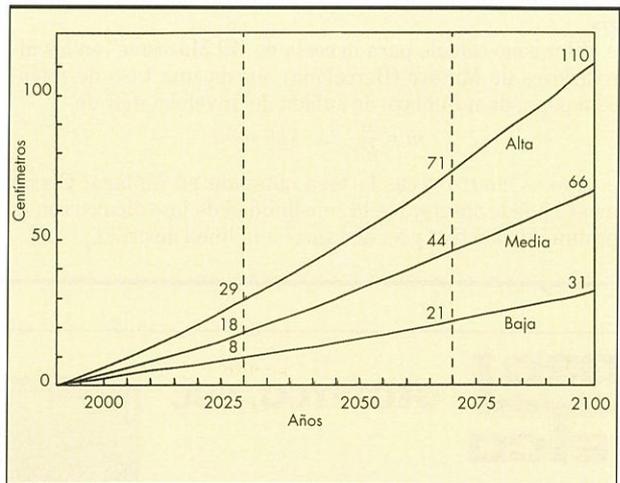


FIGURA 4. Distintos escenarios de la subida del nivel del mar 1990-2100 sin limitación de gases de efecto invernadero

2) Aunque se tengan series temporales bastante largas es difícil de asegurar la "bondad" de la medida en algunos casos.

Aún con estas limitaciones, parece ser, que sí podría hablarse de una subida del nivel del mar en nuestras costas.

A nivel internacional, y dada la importancia del tema las Naciones Unidas auspiciaron la creación de un grupo de expertos en 1998 conocido por sus siglas IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) cuya misión era y es la fundamentación científica del cambio climático, el estudio de los impactos socioeconómicos de dicho cambio y las posibles estrategias de defensa en cada caso. El IPCC creó tres grupos de trabajo que son: I, Análisis científico, II, Estudios de Impactos y III, Estrategias de respuesta. A su vez los países crearon sus propios grupos de trabajo con estructuras parecidas al de IPCC.

En lo que respecta la subida del nivel del mar el grupo de trabajo III de Estrategias de Respuesta publicó un documento en 1990, llamado "Strategies for adaptation to Sea Level Rise" (nov. 1990) en donde se establecen como su nombre indica las posibles estrategias de defensa frente al aumento del nivel del mar, y además se especifican los resultados del Grupo de Trabajo I sobre prognosis de dicha subida hasta el año 2100 (véase figura).

En la figura nº 4 podemos observar que la estimación media de la subida del nivel del mar es de unos 4 mm/año. Una estimación más conservadora de dicha subida oscila entre 1.5 y 2 mm. Hasta que no se tengan datos suficientemente contrastados se pueden usar estos valores avalados por el peso científico del IPCC.

#### 4. APLICACIÓN A LAS COSTAS ESPAÑOLAS

Para su aplicación a las costas españolas necesitamos conocer la tasa de subida del nivel del mar. Esta tasa puede estimarse por comparación con otros países de nuestro entorno, por medición directa o por aplicación de las conclusiones del Panel Internacional de Cambio Climático. En cualquier caso lo más prudente es estimar la erosión por milímetro de subida del nivel del mar. En este caso el proceso se limitará al cálculo de la profundidad activa y la distancia de este punto a la línea de orilla. A título de ejemplo hemos procedido al cálculo en la costa cantábrica. En este caso la profundidad activa puede estimarse en  $da = 25$  metros. La distancia a la línea de costa es lógicamente variable pero puede ser del orden de  $Xa = 2400$  m.

La erosión costera por cada milímetro de subida será del orden de 96 mm.

Si aplicamos la fórmula exacta para este caso de la costa cantábrica, tendremos,  $L = 2400$ ,  $A = 0.139$ ,  $x_0 = 0.0006$ , y el valor de la subida por cada milímetro sería de:

$$M = 95.392 \text{ mm}$$

Que como vemos es casi coincidente con el obtenido directamente por la regla de Bruun.

A continuación vamos a efectuar el cálculo para la costa de Málaga y concretamente para la playa de la Malagueta. En este caso la profundidad de cierre se estima del orden de  $hc = 12$  metros. Esta batimétrica se encuentra aproximadamente a 450 metros de la línea de orilla, y por tanto según la regla de Bruun.

$$m = \frac{n}{hc} \cdot L = 37.5 \text{ mm.}$$

cantidad más modesta que en el caso de la costa cantábrica, sin duda debido a que en este caso la costa es más tendida. La tasa para la playa de San Andrés en la zona Sur-Oeste del Puerto de Málaga es de 48.3 mm. por cada milímetro de subida, obtenida aplicando la misma metodología.

El mismo cálculo para la costa de "El Maresme" en los alrededores de Mataró (Barcelona) nos da una tasa de retroceso por cada milímetro de subida del nivel del mar de,

$$m = \frac{n}{hc} \cdot L = 130 \text{ mm.}$$

que es cuatro veces la tasa obtenida en Málaga. Claramente puede observarse la sensibilidad de los cálculos con la profundidad activa y su distancia a la línea de orilla.

## 5. CONCLUSIONES

Hemos visto que una magnitud típica para el retroceso costero provocada por la subida del nivel del mar podría ser en el cantábrico de alrededor de 100 mm por cada mm. En otros áreas más aplaceradas esta tasa puede ser aún mayor estimándose del orden del doble para la zona mediterránea del llamado Óvalo Valenciano. En el mar de Alborán la tasa de retroceso parece ser menor debido a las pendientes de la playa sumergida. Por el contrario los valores en El Maresme Norte son más altos.

Teniendo en cuenta que el Panel internacional antes citado estima la subida del nivel del mar en 4 mm/año, la erosión provocada por esta causa podría ser del orden de 1 metro al año en el mediterráneo lo cual, como vemos, no es nada despreciable.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- BRUUN, PER. Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. Journal of Waterways and Harbors Division, Feb. 1962.  
 DEAN R.G. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coast, Ocean Eng. Rep. 12,45 pp. + appendix, Univ. Of Del., Newark, 1977.  
 DEAN R.G. Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications, J.Coastal Res., 7(1), 53-84, 1991.  
 DUBOIS, ROGER. N. Evaluation of Bruun's Rule and Supporting Evidence. Journal of Coastal Research, 1992.  
 FERNANDEZ GARCIA, FELIPE. El cambio climático: características y mecanismos. Gestión Ambiental, 2. 1999  
 IPCC. Strategies for Adaptation to Sea Level Rise. Response Strategic Working Group. November. 1990.  
 ROS VICENT, JOAQUIN. El cambio climático y la subida del nivel del mar. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. CEDEX 1993



GEOTEYCO, S.A.

### • ASISTENCIA TÉCNICA

### • ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

### • CONTROL DE CALIDAD

#### ENSAYOS DE CAMPO

- Sondeos Geotécnicos
- Ensayos con Piezocono
- Vano test
- Ensayo con Presiómetro
- Permeabilidad "in situ"
- Determinaciones inclinométricas

#### ENSAYOS DE LABORATORIO

- Hormigones
- Cementos y Aditivos
- Aceros
- Materiales bituminosos



1995: Urbanización Interior del Plan Parcial II-5 del Ensanche Este - Pavones



#### Oficina Central:

Pº de La Habana, 81  
 28036 Madrid  
 Tel.: 914 57 06 28  
 Fax: 914 57 43 33  
 e-mail: geoteyco@CTV.es

#### Laboratorio Central:

Pol. Ind. Valdonaire  
 28960 Humanes (Madrid)  
 Tel.: 916 90 11 80  
 Fax: 916 90 24 62

Delegaciones Nacionales: Córdoba, Galicia, Vitoria.

Delegaciones Internacionales: Bélgica, Irlanda, Portugal, Grecia.