



¿QUÉ ES EROSIÓN COSTERA?

Intuitivamente entendemos que existe erosión costera cuando, comparando dos estados de una playa en dos momentos distintos, la línea de orilla está retranqueada hacia tierra en el estado más moderno. Publicamos un artículo que profundiza exhaustivamente en el fenómeno de la erosión costera –que no es tan sencillo como pudiera parecer-, definiendo los distintos tipos de ésta, aportando un esquema muy sencillo para analizar, con cierta rigurosidad si una playa o una costa está o no en erosión y poniendo numerosos ejemplos de fenómenos ocurridos en distintas playas. Por último, también se habla de la erosión ante el cambio climático.

José Manuel de la Peña Olivas, Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos
Francisco Javier Sánchez Palomar, Ingeniero técnico de obras públicas.
(Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX-Ministerio de Fomento)

1. INTRODUCCIÓN

Llevo muchos años colaborando con el Colegio, en concreto participando en los Congresos de Obras Públicas romanas. Siempre se me ha tratado y se han comportado mucho mejor de lo que yo me merezco. Alguna vez, me han sugerido que porqué no publicaba algún artículo en Cimbra. Hasta que un día se lo propuse a mi amigo y colaborador F. Javier Sánchez Palomar, le gustó la idea y los dos nos hemos puesto a trabajar en este artículo que dedicamos con cariño al Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas.

El tema elegido da la sensación de muy simple: todos nos podemos suponer más o menos qué es “erosión costera”; pero en los años que llevamos en nuestra profesión ejerciéndola con gusto en el Centro de Estudios de Puertos y Costas, nos hemos dado cuenta que lo que los ingenieros de costas entendemos por erosión, a veces, no es exactamente lo mismo que entienden otras personas. Esta misma inquietud la tuvo uno de los padres de la ingeniería de costas, Richard Silvester, que en 1978 presentó una ponencia al Congreso Internacional de Ingeniería de Costas titulado: “Some facts and fancies about beach erosion” (Algunos hechos y suposiciones sobre la erosión costera). Lo cierto, es que, tras un fuerte temporal, se suelen encontrar titulares en los periódicos del estilo de “la playa ha desaparecido”, cuando el episodio no es nada más que una situación



Costa del Maresme, entre Premià y Masnou, que sufre un problema continuo de erosión

natural de la playa que ha cambiado su perfil de bonanza por un perfil de temporal. En otros casos hemos oído cómo la erosión de las costas es debido a que la arena se va cayendo, por gravedad, irremisiblemente hacia el fondo del mar. Cuando hoy en día se oye hablar de la generalizada erosión de las costas del planeta y las nuestras en particular, resulta aleccionador pararnos un momento y reflexionar sobre ¿qué es erosión costera? Para no caer en tópicos y analizar esa erosión desde la rigurosidad que nos tiene acostumbrada nuestra profesión.

2. DEFINICIÓN DE EROSIÓN COSTERA

Intuitivamente entendemos que existe erosión costera cuando, comparando

dos estados de una playa en dos momentos distintos, la línea de orilla está retranqueada hacia tierra en el estado más moderno. Pero, siendo cierto esto: ¿podemos afirmar que existe erosión costera con esta simple observación?. Ciertamente no, ya que este retranqueo puede deberse a multitud de causas estacionales, y aún suponiendo una constancia en el tiempo de este retroceso, habría que matizar mucho si a ese estado es realmente erosivo, ya que pudiera suceder que el sedimento de la playa que antes estaba en su zona seca, se haya movido a la zona sumergida, o que exista un desequilibrio sedimentario a lo largo de todo el sistema litoral. Por lo que solamente se puede afirmar que existe erosión cierta de una costa cuando



el sistema litoral en su conjunto ha perdido sedimento, claro que para ello debemos conocer qué se entiende por sistema litoral.

Una playa cualquiera no es un elemento aislado en el conjunto del litoral, sino que forma parte de un tramo y una franja de costa, en la que cualquier cambio en dinámica litoral en un punto, afecta al resto, con mayor o menor importancia. Por tanto, la playa se encuentra inmersa y condicionada por una unidad mayor denominada Sistema Litoral. La costa se puede fragmentar en espacios independientes o unidades fisiográficas, no existiendo transporte litoral longitudinal de sedimentos de una unidad fisiográfica a otra, esto es; no existe paso de sedimentos significativo entre una unidad y la adyacente. Esta unidad fisiográfica con los sumideros y fuentes de material componen un Sistema Litoral, formando una unidad de costa independiente respecto a la dinámica litoral.

El sistema litoral, y su unidad fisiográfica, se puede, a su vez, zonificar, dividiendo su costa en tramos que tienen básicamente las mismas características respecto a la dinámica litoral, actuando y reaccionando, por tanto, de manera similar cada zona.

Cuando sí existe paso de sedimentos de un tramo de costa al contiguo, pero la cantidad que pasa es pequeña respecto a lo transportado dentro el tramo, se puede hablar de subunidades fisiográficas, siendo poco o muy poco sensibles las zonas de una subunidad a las alteraciones de la adyacente.

El sistema litoral se encuentra limitado también hacia el mar, sus límites vienen definidos por la profundidad en la que los agentes climáticos marinos, especialmente el oleaje, tienen la capacidad de movimiento de sedimento, a partir de la cual el sedimento no lo mueve el oleaje. Esta profundidad es la llamada profundidad de cierre máxima.

El sistema litoral puede entenderse que se extiende a aquellas zonas que sin estar dentro de la acción dinámica de los



agentes marinos, sí actúa directamente sobre esta zona aportando sedimentos al sistema, fuentes, como son las cuencas de los cauces fluviales, o las que lo retraen del sistema, sumideros, como son algunos fondos marinos, bahías, etc.

Esquema de un sistema litoral

Una vez que ya sabemos qué es un sistema litoral y una unidad fisiográfica, se puede definir un esquema muy sencillo para analizar, con una cierta rigurosidad, si una playa o una costa está o no en erosión.

Erosión:

- 1.- En el tiempo
 - a.- Cíclica
 - b.- Onda erosiva
 - c.- Continua o constante
- 2.- En el espacio
 - a.- Generalizada (sistema litoral)
 - Falta de sedimento
 - Alteraciones del medio
 - Cambio en los agentes
 - b.- Parcial
 - 1.- Desequilibrio del sistema litoral
 - Cambio en la morfología
 - a.- Barreras transporte longitudinal
 - b.- Barreras transporte transversal
 - Cambio de los agentes
 - Incidentes climáticos
 - 2.- Inicio de erosión generalizada
 - Falta de sedimento
 - Alteraciones del medio
 - Cambio en los agentes

Con este simple esquema se puede estudiar y analizar si una costa está en ero-

sión, en qué grado, y debido a qué. Brevemente, a continuación, se describen cada uno de los pasos de este esquema, para finalizar con tres elementos básicos en el estudio de la erosión: el balance sedimentario, que nos dirá a donde va el sedimento; la forma de medir la erosión; y cómo debe estudiarse y tratarse la erosión. Finalmente se comenta la erosión ante el cambio climático.

3. EROSIÓN EN EL TIEMPO

En ocasiones confundimos la erosión con los diversos estados naturales cíclicos de la playa. En periodos donde se producen temporales, u oleajes con cierta intensidad, la línea de orilla retrocede y la anchura de playa seca es menor, y no por ello se ha perdido sedimento, sino que está en otra zona de la playa, la playa sumergida, formado barras, escalones o bajos. Pero en periodos donde hay poco oleaje, o de bonanza, gran parte del sedimento que estaba en la zona sumergida de la playa, se acumula en la playa seca, o zona emergida, alcanzando ésta su mayor anchura; y se tiende a pensar muy frecuentemente que ésta es la anchura normal de la playa y no, como es en realidad, la máxima en un periodo de bonanza, pero no su única anchura natural.

Estos dos estados extremos de la playa, bonanza y temporal, coexisten cíclicamente en el tiempo: de un estado de bonanza, se pasa a otro de temporales que hacen variar la playa para transformarse en un elemento disipativo de la energía más eficaz, lo que provoca una reducción de anchura de playa seca y un



Estados cíclicos de la playa de Sueca en Valencia: bonanza, oleaje fuerte y temporal

aumento de su zona mojada, con plataformas en la playa sumergida de pequeño calado que provoca las típicas roturas sucesivas de oleaje; finalizado el periodo de temporales, el mar va devolviendo lentamente la arena depositada en los fondos de la playa sumergida a la playa seca para conformar una playa típica de periodo de bonanza. Suele ocurrir que la velocidad de cada uno de las transformaciones es diferente; siendo más rápido la formación de playa de temporal que la formación de playa de bonanza, lo que no debe confundirse con pérdida de playa.

Un fenómeno, desgraciadamente, frecuente en nuestras costas y en las de todo el mundo son las llamadas ondas erosivas. No es una onda en sí, sino que se produce en largas alineaciones de playa cuando, normalmente por falta o reducción drástica de la fuente de alimentación del transporte sólido litoral, el tramo comienza a erosionarse por un extremo del tramo, no notándolo el resto de la playa; existiendo un punto donde no hay ni avance ni retroceso, para, a partir de ese punto, la playa se comporta como si no hubiera ocurrido nada. Transcurrido un tiempo ese punto que separa la zona erosionada de la que ni siquiera se ha enterado, va avanzando; llamando a ese avance en el tramo en erosión como "onda erosiva". La explicación de cómo un tramo de playa no se entera de lo que le pasa al resto es bien sencilla: la pérdida de aporte de la fuente, la suple la propia playa en su extremo más cercano a ella, por lo que le llega al resto de la playa la cantidad de material suficiente; pero ese tramo que suple a la fuente se va agotando y transmitiendo a su alledaño esa descompensación, necesitando de nuevos aportes que los realiza el tramo alledaño, y así sucesivamente. En este caso sí existe una erosión real que se va transmitiendo en el tiempo a lo largo de la playa.

Cuando la playa no es de gran longitud, o existe un importante transporte transversal neto hacia el mar, entonces la línea de orilla erosionada se va retranqueando hacia tierra a la vez, produciéndose una erosión

continua y constante, pudiéndose valorar en el número de metros de disminución de anchura de playa seca al año.

4. EROSIÓN EN EL ESPACIO

Cuando estudiamos la erosión que se produce en la costa, debemos hacerlo tanto en el tiempo, como en el espacio que se produce y afecta. Desde este último punto de vista se pueden considerar dos tipos de erosiones: Generalizada en todo el sistema litoral, y parcial de un tramo de costa.

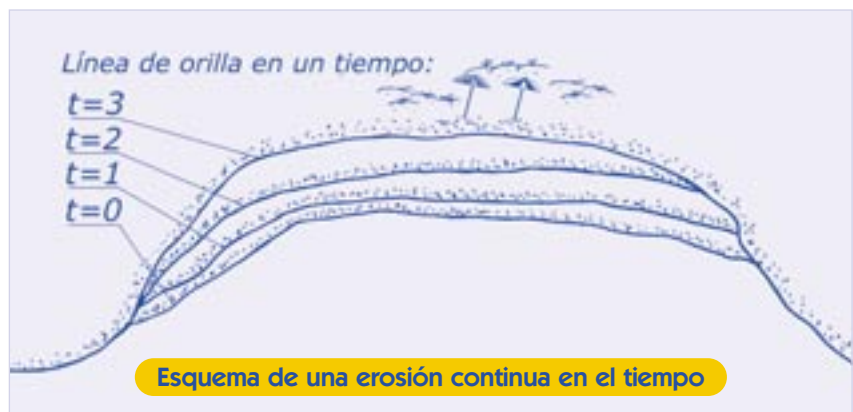
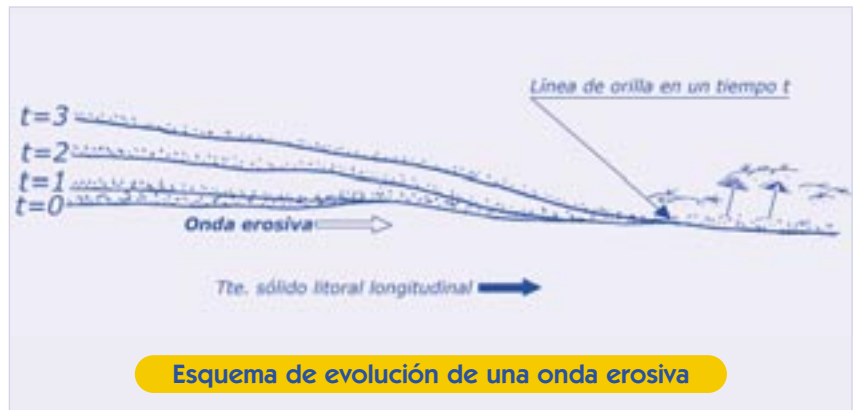
4.1. Erosión generalizada

Se produce cuando todo un tramo de costa, amplio y que ocupa todo o prácticamente todo el sistema litoral, se encuentra en erosión. Esa erosión puede ser debida fundamentalmente a tres causas:

- Falta de sedimento que se incorpora al transporte sólido litoral.
- A una alteración del medio eliminando la continuidad del transporte sólido litoral y mermándolo.
- Produciéndose una alteración de los agentes climáticos marinos que actúan en la costa.

El sedimento que se incorpora a la costa formando las playas puede tener, básicamente, tres orígenes: arrastrados por los cauces fluviales que desembocan en el mar, provenientes de animales marinos como conchas, corales, etc, y de la erosión de la propia costa como playas cantiles, acantilados, etc. Cuando la fuente principal de sedimento que se incorpora a la costa se reduce o deja de facilitar material, el mar sigue transportando material a lo largo de la costa que lo toma de la playa, y se erosiona si no le llega material de reposición.

Cuando sobre una costa abierta con un transporte sólido litoral continuo se interpone una barrera, como un puerto, un espigón etc, la dinámica litoral imperante en el tramo se interrumpe, provocando una descompensación sedimentaria: al





lado de barloomar se acumula continuamente material, mientras que del lado de sotamar se va produciendo una erosión continuada; pudiendo alcanzar la descompensación más de 500 metros.

Otra forma de reducir o aumentar la erosión es alterar artificialmente los agentes climáticos marinos que inciden en la costa, mediante obras que producen un desequilibrio en la dinámica litoral. Suele ser frecuente en diques curvos que provocan una difracción de oleaje, alterando toda la dinámica litoral en su zona de influencia; en ocasiones provocando erosiones generalizadas y en ocasiones solo parciales.

4.2. Erosión parcial

En ocasiones, la erosión que se produce solamente afecta a una zona de la playa, no transmitiéndose al resto, considerándose ello como una erosión parcial, aunque, a veces, ésta indica el inicio de una erosión generalizada, no siendo más que una fase inicial de ella; por tanto, la erosión parcial puede ser de dos tipos:

- Debida a un desequilibrio del sistema.
- Como inicio de una erosión generalizada.

Se entiende por erosión debida a un desequilibrio en el sistema litoral cuando en la evolución normal de la costa del sistema litoral se introduce artificialmente o de forma natural un elemento distorsionador que altera tanto la evolución y forma de la playa, como

el transporte sólido litoral. Estos desequilibrios del sistema pueden ser debidos a introducir en la costa obras de defensa como son los espigones o los diques exentos, que sin ser barreras totales que afectan a todo el sistema litoral, provocan una barrera parcial al normal movimiento de sedimentos a lo largo de la costa; provocando a barloomar acumulaciones importantes mientras que a sotamar de las obras se produce una erosión, que nor-

malmente es localizada y parcial pues el sedimento es capaz de atravesar la barrera que supone el espigón o dique exento.

También se producen desequilibrios que provocan erosiones parciales o locales cuando se altera o cambian de forma natural o artificial las características de los agentes climáticos. Un ejemplo muy característico que suele suceder en muchas partes de la costa española son los llamados basculamientos debido a la persistencia no habitual de una dirección de oleaje. Ejemplos típicos se producen en las playas del litoral del mar de Alborán o de la costa de Cataluña, donde el oleaje principal proviene del noreste; pero ha sucedido a comienzos de siglo que durante un periodo de tiempo prolongado, los oleajes principales vinieron del sureste, haciendo bascular las playas hacia el norte, llegando a descalzar paseos marítimos como el de Lloret de Mar.

En otras ocasiones los agentes climáticos marinos, especialmente oleaje y corrientes, son perturbados o alterados por cau-



sas no provocadas pero sí artificiales, ejemplo característico es el que se produce en la playa de Roquetas de Mar en Almería, en la zona llanada La Laja del Palo, donde existe un dique romano de hormigón en masa del siglo I dC, único en España, que provoca una alteración en el oleaje incidente concentrado y dirigiendo la energía, como onda corredera, que produce en mordisco local de erosión.

Hay casos curiosos, como el que sucede en la playa del Riuet cerca de Sant Martí d'Empuries, donde para proteger una duna litoral, en teoría asociada como sistema dunar a la playa, se construyó un muro que cortaba la playa seca de su sistema, éste actuó como elemento reflejante del oleaje incidente provocado una erosión local y parcial de la zona; paradojas de la vida.

Dentro del tipo de erosiones parciales existe una de ellas que no es debida a agentes marinos de ningún tipo. Suelen ser poco frecuentes, pero muy espectaculares. Se deben a agentes climáticos no marinos, ejemplo de ello se dio en las playas de las Villas de Benicásim donde una gota fría y el consiguiente aguacero hicieron que el agua que discurría hacia el mar erosionase espectacularmente las playas, hasta tal punto que tuvieron que ser regeneradas.

Por último se debe tener en cuenta que gran parte de las erosiones generalizadas en el sistema litoral comienzan por ser erosiones locales o parciales que afectan o al tramo más sensible o al inicio de éste.

5. ¿HACIA DÓNDE VA EL SEDIMENTO EROSIONADO?

Después de leer estas reflexiones sobre la erosión, la siguiente pregunta sería ¿hacia donde va todo el material que se erosiona? La respuesta puede ser sencilla, pero no se debe caer en tópicos, como hemos oído decir a alguien, que se consideraba experto, que la erosión era debida a que el sedimento se iba cayendo por gravedad hacia el fondo del mar. Para realizar un análisis algo riguroso hay que hacer lo que se llama en tér-



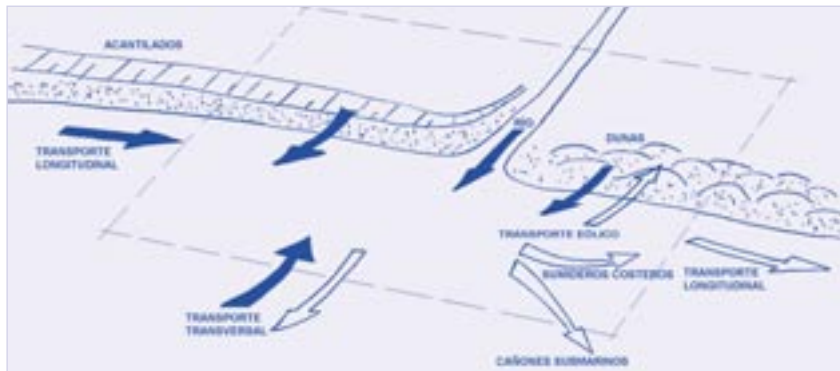
Playa de Roquetas de Mar, conocida como La Laja del Palo, con una erosión local producida por la presencia de un dique romano sumergido de hormigón en masa del siglo I.



Playa del Riuet en Sant Martí d'Empuries en Gerona



Playa del Las Villas de Benicásim antes y después de ser erosionada por liadas de agua en una gota fría



Esquema de las variables sedimentarias a considerar en un balance sedimentario de un tramo de costa (Peña, 2007)

minos de ingeniería de costa como "balance sedimentario". El balance sedimentario de un tramo de costa es determinar las entradas y salidas de material que tiene a lo largo de un periodo de tiempo determinado; y con ello evaluar si ese tramo se encuentra en erosión, o por el contrario tiene aumento de material.

Para realizar el balance sedimentario, lo primero que debe delimitarse son los bordes o límites de ese tramo, tanto lon-

gitudinalmente como transversalmente. Una vez realizado, debe calcularse el transporte sólido litoral, longitudinal y transversal; el transporte eólico; el aporte de fuentes terrestres y marinas de material; y los sumideros de sedimento, tanto costeros como puramente marinos como son los cañones submarinos.

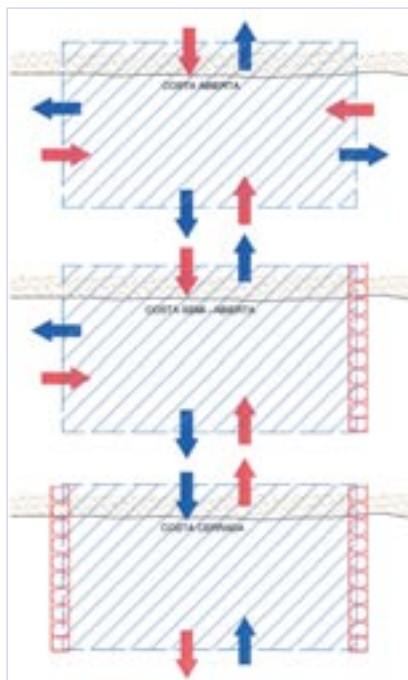
Una vez conocidas las variables sedimentarias, habría que estudiar, para cada uno de los cuatro frentes del tramo cuál es su

balance en el periodo de tiempo considerado, teniendo en cuenta las características del tramo: si es una costa abierta, cerrada o semi cerrada.

Determinadas todas las variables sedimentarias del tramo costero en cuestión, puede llegarse a la conclusión si la costa está en erosión o no, esto es, si ese tramo ha perdido sedimento o material. Pues pudiera ser que no perdiendo sedimento, la costa se hubiese alterado. Esa alteración puede ser básicamente de dos tipos:

- Basculamiento o descompensación sedimentaria aérea.
- Cambio de perfil o descompensación sedimentaria aérea - sub aérea.

En el primero de los casos la playa en planta se descompensa, produciéndose un basculamiento o giro de la línea de orilla a lo largo del tramo, o bien el sedimento emigra produciéndose otras formaciones aéreas como son flechas emergidas.



Balance sedimentario dependiendo del tipo de tramo costero (Peña, 2007)



Basculamiento típico de la línea de orilla de una playa



Formaciones aéreas emergidas como flechas o bajos



Pero pudiera suceder que las transformaciones sean debidas a cambios del perfil de playa: la arena emigra de la playa seca a la playa sumergida, reduciendo el calado de los fondos. Esto es típico de situaciones de temporal; pero puede suceder que la persistencia haga que el propio perfil cambie manteniendo la reducción de calados en periodos de bonanza.

En los casos citados de descompensación ese tramo de costa no se encuentra en erosión; aunque en apariencia sí lo esté, por lo que la siguiente pregunta que nos haríamos es: ¿cómo podemos medir si un tramo de costa se encuentra en erosión o no?, a ello intentaremos responder en el siguiente apartado.

6. ¿CÓMO DEBE MEDIRSE LA EROSIÓN?

Existen dos características básicas que hay que atender para determinar la erosión de un tramo de costa:

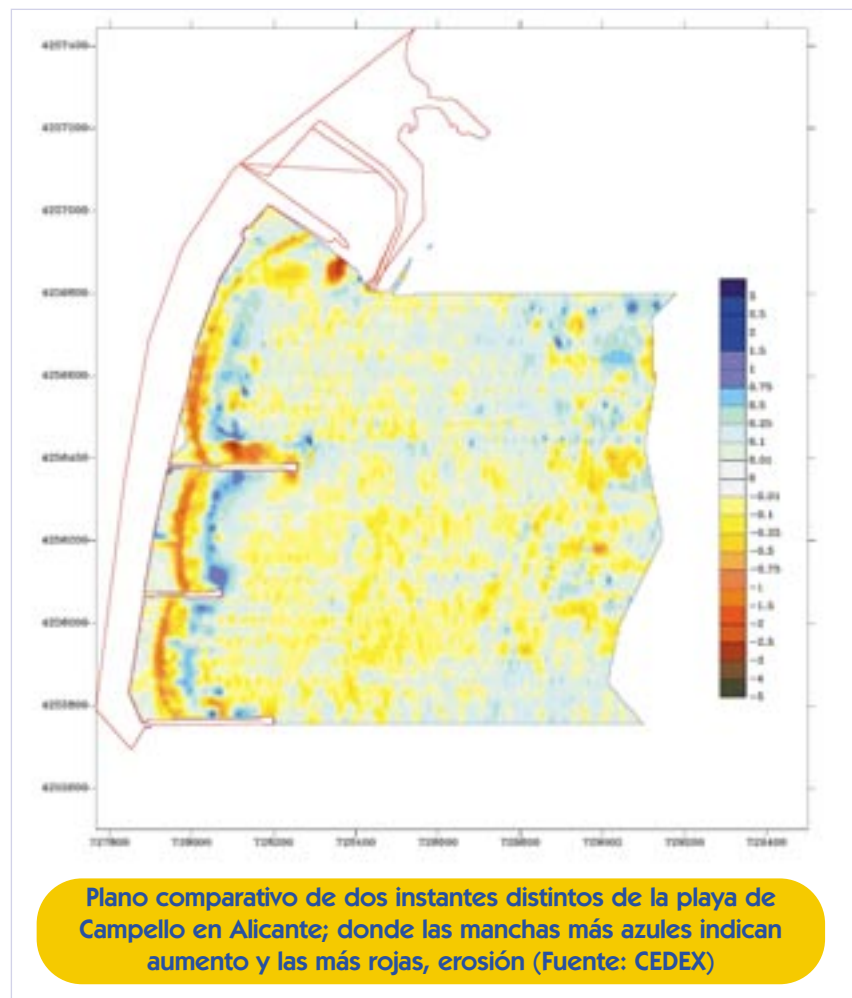
- En el tiempo
- En el espacio

Se entiende medir la erosión en el tiempo cuando comparamos el estado de un tramo de costa en dos tiempos distintos y determinamos las variaciones que se han producido en él. El plano estaría formado por una serie de manchas o áreas que indicarían las zonas de erosión y las zonas de aumento. Compensando unas con otras se determinaría si ese tramo ha perdido, está en erosión o ha ganado sedimento, está en aumento, o no ha variado.

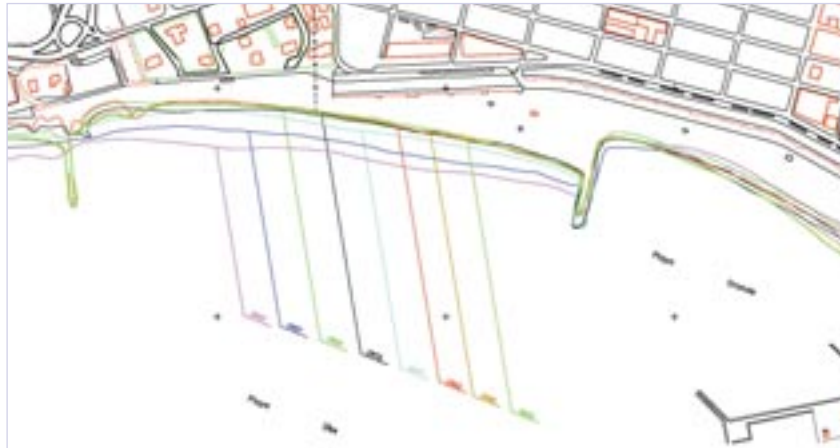
El cálculo de las variaciones que se producen en un área determinada de la costa es costosa y solamente práctica cuando se trata de un tramo o playa concreta; siendo en la práctica impracticable si se extiende a todo el sistema litoral y, además, durante un espacio de tiempo

prolongado. Entonces se recurre a determinar los cambios que se producen en un tramo de costa mediante Planos de Evolución de la Línea de Costa, como los que posee el CEDEX de las costas españolas; que son restituciones fotogramétricas de la línea de orilla en un instante determinado. Mediante esta técnica se puede conocer de forma sencilla y práctica como ha ido variando la línea de costa a lo largo del tiempo. Solamente hace falta realizar un vuelo fotogramétrico, o en su caso una fotografía espacial de satélite, y restituir la línea de orilla, haciéndolo en diversos instantes.

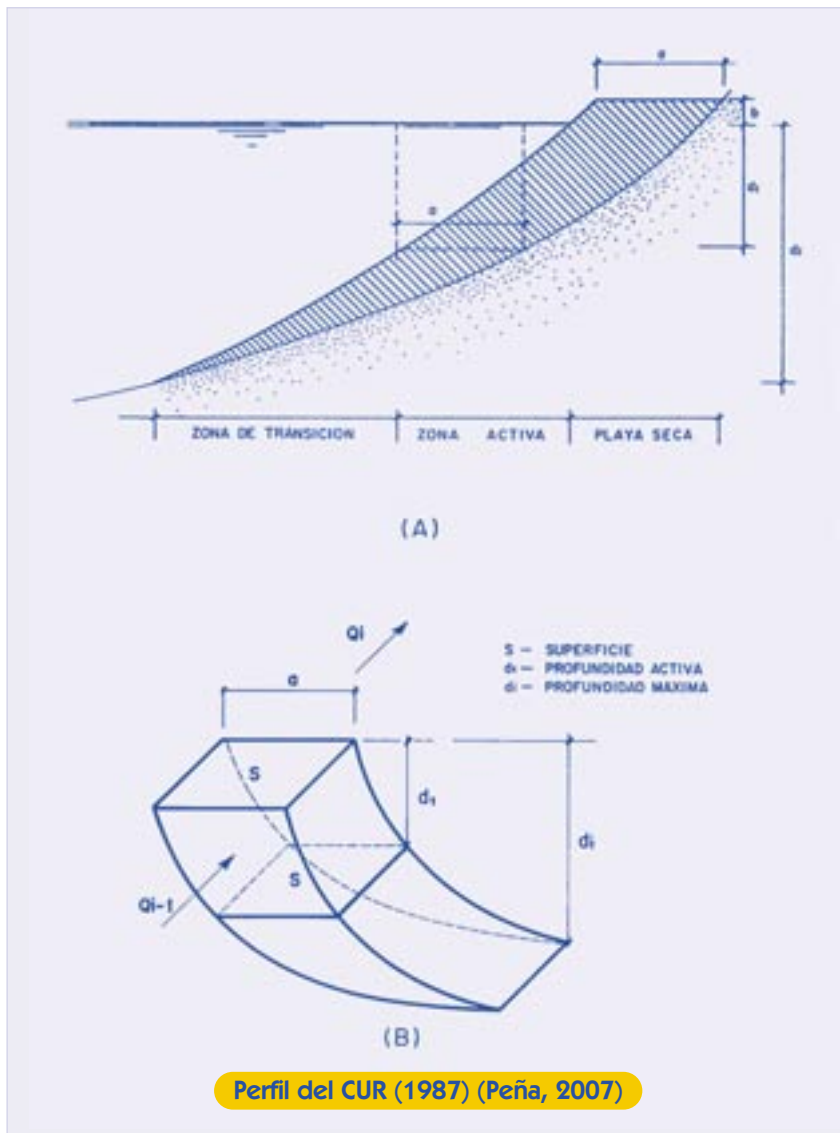
Para que las líneas de costa sean comparables, con una cierta fiabilidad deben hacerse en periodos de bonanza. Para transformar las variaciones superficiales que dan los planos de evolución en variaciones de volúmenes de arena, se



Plano comparativo de dos instantes distintos de la playa de Campello en Alicante; donde las manchas más azules indican aumento y las más rojas, erosión (Fuente: CEDEX)



Detalle de los Planos de Evolución de la Costa Española del CEDEX correspondiente a la bahía de Palamós (Fuente: CEDEX)



Perfil del CUR (1987) (Peña, 2007)



puede recurrir a determinar la variación teórica aproximada del perfil de playa. Para ello se recurre a la metodología utilizada por Delft (CUR, 1987) de tipo de perfil (Peña, 2007).

Este perfil, basado en las teorías de Harlermeier (1978, 1981) y Bierkermeier (1985) supone que el perfil de playa varía de tal forma que hasta una profundidad d_f , conocida como profundidad de cierre activa, se traslada paralelamente el perfil, y a partir de ésta, ambos perfiles convergen hasta una profundidad d_f , conocida como profundidad de cierre máxima, por lo que el volumen de sedimento en una superficie de playa S será:

$$V = S \cdot d_f + 1/2 S (d_i - d_f) = 1/2 S (d_i + d_f)$$

Si consideramos que existe una relación entre ambas profundidades: $d_i = n \cdot d_f$, entonces:

$$V = 1/2 (n + 1) d_f S = S \cdot d_f$$

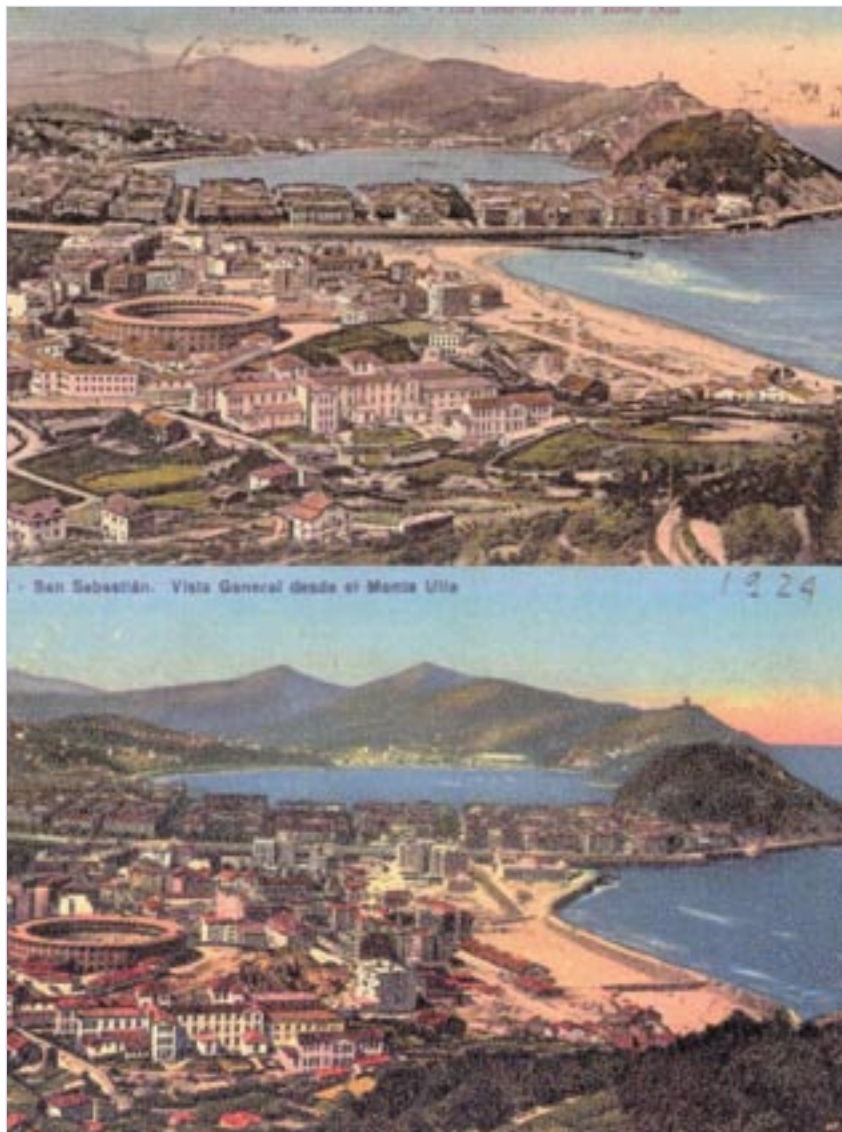
Siendo d_f una profundidad ficticia de valor: $1/2 (n + 1) d_f$, que en las costas españolas mediterráneas suele oscilar entre 5 y 7 metros.

Si se considera como variable principal el espacio, para determinar la erosión, ésta se podrá medir considerando:

- Erosión en un ámbito total, o absoluta
- Erosión zona aérea, playa seca, o relativa
- Erosión parcial, o de un tramo

Cuando se quiere medir la erosión en valor absoluto, debe considerarse todo el sistema litoral, tanto su parte terrestre como sumergida, porque si únicamente se mide la playa seca, pudiera suceder que el material que hipotéticamente se ha erosionado esté en la playa sumergida. Por lo que debe gestionarse la erosión en su conjunto y no llamar erosión a lo que es descompensación sedimentaria del sistema o cambio de perfil natural.

Además para evaluar la erosión de una zona no debe excluirse zonas que antiguamente eran de playa que se han incorporado al entramado urbano.



Playa de la Zurriola de San Sebastián en dos postales de 1900, superior, y 1924, inferior, donde la playa se estaba incorporando al entramado urbano del barrio de Gros

7. LA EROSIÓN COSTERA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

El último de los apartados está dedicado a dar una pequeña descripción de lo que en ingeniería de costas se entiende por erosión costera, trata de ésta frente al cambio de clima. Debe verse, en líneas muy generales, desde tres perspectivas diferentes:

- Reducción de aportes de sedimentos a las playas
- Cambio del clima marítimo
- Cambio del nivel medio del nivel del mar

La costa va alimentándose de sedimento que una gran parte proviene de los aportes de los cauces fluviales; el aumento o disminución de su caudal es esencial para la capacidad que el cauce tenga de transportar sedimento. Una disminución de las precipitaciones reduciría el aporte, pero si éstas se realizan de forma brusca que provoquen avenidas, podría compensarse; ahora bien, en la actualidad las cuencas de los ríos en su gran mayoría se hallan reguladas, por lo que la merma es mucho mayor, debida a esas regulaciones que en la actualidad las costas sufren.

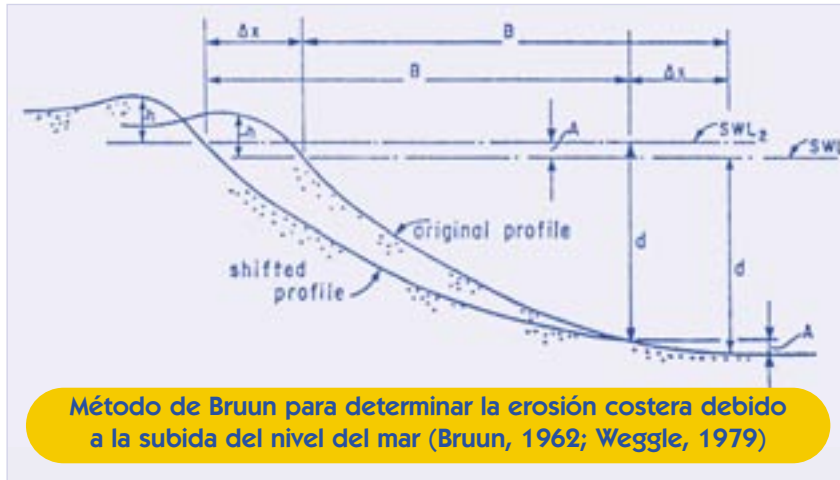
El clima marítimo que afecta directamente a la costa depende del clima y la morfología de las costas. Si se producen variaciones importantes en el clima, éstas se verán reflejadas en el oleaje y corrientes que afectan directamente a la costa, alterando el transporte sólido litoral, pero la medida en que lo haga es difícil de determinar.

Lo que sí está muy estudiado es las transformaciones que se pueden producir en las costas cuando varía el nivel del mar. En el año 1962 el ingeniero de costas danés Per Bruun introdujo el método "Similarity profiles" o más conocido como método de Bruun en su artículo titulado "Sea-level rise as a cause of shore erosion" (subida del nivel del mar como causa de erosión costera). Su teoría se considera válida hoy en día. Fue aplicada y ampliada por Weggel (1979) para las costas de Florida. El método de Bruun asume que el perfil de la playa, cuando se va elevando el nivel del mar en un largo plazo, se mueve sin cambios en su forma, migrando hacia tierra.

Si el nivel del mar aumenta una cantidad A , la cantidad de material por unidad de longitud de playa necesaria para restablecer los calados del fondo a una distancia B de la línea de orilla es: $A \cdot B$. El volumen de arena por unidad de longitud de playa $A \cdot B$ debe provenir de su perfil activo erosionado. La cantidad erosionada del perfil, o retroceso de la línea de orilla, ΔX , se puede determinar haciendo el balance sedimentario entre los dos perfiles e igualando con el volumen $A \cdot B$. Esta área entre perfiles viene dada por $\Delta X (h + d)$, que representa la cantidad de arena necesaria para restablecer la playa a su estado original. Igualando los dos volúmenes:

$$A \cdot B = \Delta X (h + d) \quad \text{ó} \quad \Delta X = A \cdot B / (h + d)$$

Para conocer el valor de la erosión de la anchura de playa por subida del nivel del mar, ΔX , es necesario conocer d y B . Pero d es el límite de la profundidad activa del perfil, esto es la profundidad de cierre activa, que anteriormente se le ha llamado d_1 , con lo que solamente sería necesario conocer B . Por ejemplo, si se usan los perfiles teóricos de Weggel o de Buun-Dean, el valor de la erosión de playa ΔX , vendría dado por:



Perfil de Weggel (1979): $y - y_0 = d \cdot e^{-\alpha x}$
 donde y son las abscisas, y_0 es un valor a determinar, x son las ordenadas, d es la profundidad de cierre activa y α es otro valor a determinar. Cuando $y = d$, $x = B$, entonces:

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

Perfil de Bruun-Dean: $y = C x^n$
 donde y son las abscisas y x las ordenadas, y n un valor que para Bruun es 2/3 y Dean halló que C dependía de las características granulométricas de la arena. Cuando $y = d$, $x = B$, entonces:

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

Aunque, hoy en día existen zonas de baja cota, como el delta del Ebro, donde una pequeña subida del nivel del mar unido con oleaje hacen que todo un

tramo de costa se inunde, como sucede cada cierto tiempo con la península del Fangar en el delta del Ebro, arrasando literalmente todos los sistemas dunares que se forman en ella.

8. CONCLUSIONES

De las nociones descriptivas que hemos querido reflejar en este artículo, deben destacarse por su importancia:

- Cuando se habla de erosión debe indicarse a qué se refiere, si parcial, general, etc.
- Cuando se requiera determinar si una costa se encuentra en erosión o no debe analizarse en su conjunto en todo el sistema litoral y no solamente en la zona seca de la playa.
- A la hora de gestionar la erosión debe hacerse en el conjunto del sistema.



- A falta de una herramienta más eficaz, la erosión debida al cambio climático debe analizarse siguiendo el método de Bruun. ■

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Birkemeier, W.A. (1985). *Field Data on Seaward Limit of Profile Change*; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (vol. 111, nº 3, pp. 598 a 602).

Bruun, Per (1962). *Sea-level rise as a cause of shore erosion*; Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE (vol. 88, pp. 117 a 130).

C.U.R (1987). *Manual on Artificial Beach Nourishment*; Center for Civil Engineering Research, Codes and Specifications (report 130).

Hallermeier, R.J. (1978). *Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion*; Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering (pp. 1493 a 1512).

Hallermeier, R.J. (1981). *A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate*; Coastal Engineering (vol. 4, pp. 253 a 277).

Peña Olivas, José Manuel (2007). *Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas*; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (colección señor nº 39).

Silvester, Richard (1978). *Some facts and fancies about beach erosion*; Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering (pp. 1888 a 1902).

Weggel, J. Richard (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 Research Center (Coastal Engineering Technical aid nº 79-2).