

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN COSTERA. REVISIÓN, TENDENCIAS Y PROPUESTA

José Ojeda Zújar

Departamento de Geografía Física y AGR
Universidad de Sevilla

RESUMEN

En este artículo se realiza una revisión crítica de las metodologías utilizadas para el cálculo de los riesgos de erosión, tanto de la peligrosidad natural (tasas de erosión) como de algunos aspectos de la vulnerabilidad (cartografía de la peligrosidad natural actual y potencial). Se analiza la adecuación de las fuentes de información clásicas a estos análisis (cartografía y fotografía aérea) y el impacto de nuevas tecnologías (GPS, fotogrametría digital y altimetría láser aerotransportada), así como su precisión geométrica. Se evalúa el interés de nuevas expresiones para las tasas de erosión (tasas superficiales y volumétricas) y se revisan los métodos para los cálculos de la evolución futura de la línea de costa (análisis de tendencias históricas y modelización numérica).

Palabras clave: erosión costera, tasas superficiales y volumétricas, fotogrametría digital, Lidar, modelización numérica.

ABSTRACT

This article presents a critical review of the methodologies used to calculate erosion hazards, both the risk evaluation (erosion rates) and certain aspects of vulnerability (mapping present and potential natural hazards). The adequacy of classical sources of information (maps and aerial photography) is analysed, as are the impact and geometric precision of new technologies (GPS, digital photogrammetry, and airborne laser topography). New expressions for rates of erosion (areal and volumetric measurements) are evaluated as well as the

Fecha de recepción: febrero de 2001.
Fecha de admisión: junio de 2001.

methods for calculating the future evolution of the coastline (trend analysis of historical data and numerical modelling) are reconsidered.

Key words: coastal erosion, areal and volumetric rates, digital photogrammetry, Lidar, numerical modelling.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo, más que una contribución científica sobre los riesgos de erosión costera en una zona determinada, se centra en realizar una reflexión crítica sobre la forma en que se han evaluado estos riesgos en el ámbito científico/técnico y sobre las aportaciones que las nuevas técnicas de obtención y análisis de datos, así como recientes estrategias de gestión, puedan introducir en los métodos clásicos más utilizados. Los procesos de erosión costera, bien de forma natural o inducidos antrópicamente, presentan una serie de características que permiten catalogarlos de riesgos naturales y, si a ello unimos la tradicional presión sobre la franja litoral, su antropización creciente y progresiva (nuestro país es un ejemplo evidente) y las recientes «alarmas» sobre una intensificación de estos procesos naturales por causas antrópicas de carácter local (retención de sedimentos en los embalses, obras de infraestructura costera...) o global (la esperada subida del nivel del mar ligada al cada día más constatado recalentamiento terrestre —IPCC, 1995 y 2001—), parece obvio que la magnitud de los daños que puedan causar en el futuro exige un replanteamiento metodológico en sus procedimientos de evaluación.

En este artículo se entiende por erosión costera la modificación (retroceso) de la línea de costa preexistente con la consiguiente pérdida de sedimentos. Aunque constituye un tema clásico en la tradición de la geomorfología costera (Pardo, 1991; Viciana, A. 1998) y en la literatura sobre riesgos naturales (Lechuga, 1995) y, aunque puede presentarse unido (en eventos de baja frecuencia y alta intensidad como temporales —*storm surges*— y tsunamis) a los riesgos de inundación, posee características diferenciadoras tanto desde la perspectiva de las metodologías para evaluar el riesgo, como desde las estrategias y experiencias de su gestión y mitigación. Por otra parte, la complejidad de los procesos físico-naturales asociados a la erosión costera (factores de orden global y local, carácter cíclico y no lineal de muchos procesos, etc.) nos han llevado, más que a plantear un análisis del proceso en sí mismo, a centrar el artículo en una revisión de las técnicas de medición, análisis y cuantificación de sus efectos, en la realización de una síntesis de los métodos clásicos empleados y en el impacto que en los mismos tendrá la incorporación de nuevas técnicas y metodologías de análisis, así como en proporcionar información de orden práctico que pueda servir de ayuda a las personas (científicos, técnicos y gestores) implicadas de una u otra forma en el análisis y gestión de estos riesgos.

Por todo ello, en este artículo se tratarán básicamente los aspectos ligados a la evaluación del riesgo y se centra tanto en las técnicas para la estimación de la peligrosidad natural (probabilidad de ocurrencia), como en los métodos para cartografiar aquélla y poder proceder al análisis de la vulnerabilidad (evaluación de daños, cuyos aspectos de valoración económica no se contemplan en este artículo).

2. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD NATURAL

Dentro del concepto de erosión costera debemos establecer una diferencia en atención a las escalas espacio-temporales en que se manifiesta este fenómeno natural y a las formas en que opera. En este sentido, es necesario diferenciar los procesos erosivos ligados a fenómenos extremos de baja frecuencia y alta velocidad de implantación (temporales) que conllevan la erosión de importantes sectores de costa, pero cuyos sedimentos erosionados, al menos en parte, vuelven al sistema sedimentario litoral cuando pasa el evento y cambian las condiciones hidrodinámicas que lo controlan (paso de un oleaje de alta energía a otro de baja); y los procesos de erosión a largo plazo, a veces un fenómeno difuso, menos espectacular y perceptible pero que, debido a la existencia de un balance sedimentario negativo en la franja litoral, conllevan no sólo la pérdida de sedimentos y el retroceso de la costa, sino una intensificación de los procesos erosivos (y de los daños) ligados a los fenómenos extremos antes citados.

En cualquiera de los casos anteriores, el análisis de la peligrosidad natural se ha abordado clásicamente como el cálculo de «tasas de erosión» expresadas en metros de retroceso/año. Por lo tanto, ha sido considerado, desde la perspectiva geográfico/espacial como un problema bidimensional, es decir, medir la variación espacial en la posición (x,y) de dos líneas de costa para fechas diferentes. Estos métodos exigen dos fases bien diferenciadas: (i) la obtención de datos o fuentes de información que permitan «reconstruir» la posición de la línea de costa en fechas pasadas; (ii) la utilización de técnicas adecuadas para medir geoméricamente los cambios, así como procedimientos analíticos para calcular las tasas de erosión. Ambas fases son esenciales, si bien la primera es crucial ya que proporciona los datos para la segunda.

Con el término «reconstrucción» de la línea de costa se hace alusión a la posibilidad de localizar con una determinada precisión métrica antiguas líneas de costa y, en este sentido, es esencial la calidad geométrica de las fuentes de información y su disponibilidad temporal. Entre las fuentes de información disponibles debemos diferenciar dos bloques. La cartografía, la fotografía aérea y la teledetección espacial (debido a su largo periodo de registros) por una parte, y las nuevas técnicas de posicionamiento global (GPS) y la altimetría láser aerotransportada (sólo disponibles para los últimos años en el mejor de los casos, pero de gran proyección para el seguimiento de la línea de costa en el futuro) por otra. De cualquier forma, antes de extraer datos de estas fuentes es necesario subrayar la especial importancia de: (i) definir la línea de costa a utilizar; y (ii) evaluar la precisión geométrica de las fuentes de información ya que, en parte, condicionan las escalas espaciales a las que podemos trabajar.

Datos y fuentes de información

La cartografía es el documento de mayor recorrido histórico, aunque es necesario distinguir entre los mapas topográficos y las cartas náuticas. Esta diferencia se justifica por definir la línea de costa de forma diferente: en las cartas náuticas aparece de forma imprecisa una línea de contacto entre el mar y las tierras emergidas, y con mayor precisión el denominado «cero hidrográfico» (la bajamar viva equinoccial en sizigias). En los mapas topográficos encontramos mayor variabilidad. En algunos países se adopta la posición de la pleamar en

mareas vivas (las hojas «NOS» en Estados Unidos, uno de los documentos más usados para este fin —National Research Council, 1990,123—), pero en otros (como en nuestro país), aunque en teoría debería ser el «cero topográfico» definido como el nivel medio del mar en un puerto de referencia (Alicante para toda España, salvo Canarias), lo cierto es que en muchos casos (sobre todo a escalas detalladas) encontramos líneas que responden a criterios imprecisos (línea de agua instantánea, límite de la playa seca, etc.). El seleccionar una costa u otra puede llevar a grandes errores de cálculo final cuando se trabaja con documentos que utilizan criterios diferentes, y estos errores pueden ser potencialmente mayores en la medida en que aumenta la escala y el rango mareal. En relación a la calidad geométrica de los documentos, es interesante subrayar que la cartografía topográfica sólo a partir de finales del siglo XIX proporciona suficiente precisión para ser utilizada en estos estudios en España (red geodésica y de nivelación), mientras la cartografía náutica extiende esta calidad métrica hasta prácticamente el final del siglo XVIII (Fig.1) y principios del XIX. Por último, las escalas a que estos documentos históricos están disponibles (exceptuando levantamientos de detalle



Figura 1. Detalle (desembocadura del Guadalete) de la carta náutica realizada por M. Tofiño para la Bahía de Cádiz en 1789.

aislados) no permiten más que identificar cambios sustancialmente importantes y establecer tendencias generales, pero no mediciones precisas.

La fotografía aérea constituye el documento más utilizado para el cálculo de tasas de erosión (Ojeda, J. y Vallejo, I. 1995, Viciano, A. 1998), si bien su recorrido temporal comienza en los años 30 y 40. En estos documentos, la definición de la línea de costa es un criterio que no viene establecido, sino que es «interpretado» por el investigador o técnico. Quizás el elemento más utilizado es la línea de contacto entre la duna costera (*foredune*) y la playa alta (*backshore*). Este criterio tiene la ventaja de evitar los problemas derivados de la utilización de otros que se ven influidos por la variabilidad estacional de las playas (límite de playa seca, marea alta, etc.) y se considera como un buen indicador de los cambios a largo plazo. En España se dispone de vuelos de cobertura nacional prácticamente desde los años 40 (primer «vuelo americano» casi completo) realizados por diversos organismos de la administración central (1956, 1978, 1985...) con escalas comprendidas entre el 1:30.000 y el 1:18.000 en la mayoría de los casos (Fig. 2), así como un número bastante más abundante durante las últimas décadas, debido a la incorporación de las Comunidades Autónomas en la producción de cartografía topográfica básica (las escalas de los vuelos de apoyo, para los que tienen mayor cobertura, suelen ser similares a las anteriores o incluso algo más detalladas —1:10.000, 1:15.000...—). Quizás el organismo que posee los vuelos fotogramétricos de mayor escala de detalle, con una amplia cobertura nacional y, paradójicamente, poco utilizados por los científicos y técnicos no ligados a la ingeniería de costas, son los realizados por la Dirección General de Costas, la mayor parte de ellos con escalas cercanas al 1:10.000 y mayores. Esta escala de detalle y el hecho de existir vuelos desde los años 70 los hace especialmente adecuados para el cálculo de las tasas de erosión.

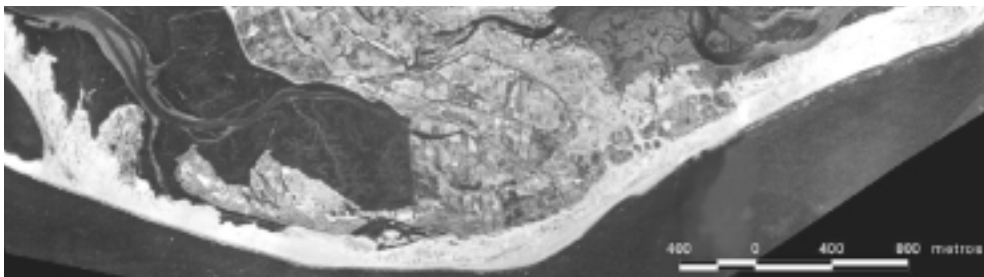


Figura 2. Detalle de un sector de la costa de Isla Canela en la desembocadura del Guadiana. Vuelo fotogramétrico de 1956, el denominado «vuelo americano» (escala original 1:33.000).

La teledetección espacial ofreció un elevado volumen de datos sobre las zonas costeras desde sus inicios (años 50-60) con una elevada periodicidad, si bien su utilización para los cálculos de tasas de erosión está limitada por su resolución espacial. En este sentido, aunque con el lanzamiento del sensor MSS-Landsat (resolución 80 metros) empiezan a aparecer las primeras aplicaciones para el cálculo de tasas de erosión, no será hasta el lanzamiento de los sensores Landsat-TM (30 mts.) y Spot-XS (20 mts.) y Spot-P (10 mts.), cuando su aplicación

en estas medidas es realmente operativa (Ojeda, J., 1988). Como puede deducirse por su resolución espacial, sólo son aplicables a tramos costeros donde los cambios sean significativos, y su utilidad se centra en cubrir los huecos que dejan las fotografías aéreas (su elevada periodicidad permite completar periodos no cubiertos por aquéllas) o en constituir la única fuente de información en áreas donde no existen vuelos o cartografía disponible. Con la aparición de sensores de mayor resolución como el satélite IRS (5 mts.) y los nuevos sensores ya operativos (Orbview, Ikonos, etc.) de escala métrica, su utilidad se acerca cada día más a la que ofrece la fotografía aérea (Fig. 3), si bien su recorrido temporal hacia fechas anteriores es menor.



Figura 3. Detalle de Isla Canela en la desembocadura del Guadiana. Imagen pancromática del satélite indio IRS (resolución espacial 5 mts.).

Entre las técnicas utilizadas para realizar estudios sobre cambios de la línea de costa a gran escala de detalle, el procedimiento clásico ha sido utilizar levantamientos topográficos con estación total, sin embargo su utilidad, debido al coste en tiempo y dinero, quedaba restringida a estudios de zonas muy localizadas, siendo la metodología habitual la realización de perfiles transversales en la costa. Durante los últimos años la aparición de nuevas tecnologías para el levantamiento topográfico de detalle ha abaratado sustancialmente los costes y están plenamente operativas para los objetivos de este artículo incluso en grandes extensiones. Entre ellas, parecen especialmente indicadas para el cálculo de las tasas de erosión el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que en modo diferencial permite precisiones de orden sub-métrico, y la altimetría láser aerotransportada (LIDAR). En esta última, a diferencia del GPS y la estación total que obtienen la información «punto a punto» para perfiles o itinerarios definidos, la combinación de un vector aéreo equipado con GPS y sistema de navegación inercial junto a un altímetro láser de barrido, proporciona directamente modelos digitales del terreno de resolución espacial de orden métrico y precisión altimétrica de decenas de centímetros (Stumpf, R., et al., 1999). Con cualquiera de ellos, una vez definida el segmento o área a restituir, con un procedimiento sencillo y de un coste no más elevado al de la fotografía aérea, es posible llevar a cabo análisis de gran precisión y, adicionalmente, con la tecnología LIDAR, se proporciona información altimétrica de carácter continuo (Fig. 4). Su limitación es que no tienen posibilidad retrospectiva, por lo que son técnicas de aplicación en cambios muy recientes (de algunos años atrás en el mejor de los casos) y, sobre todo, en el seguimiento de la evolución futura para lo que constituyen, sin duda, la mejor opción tecnológica.

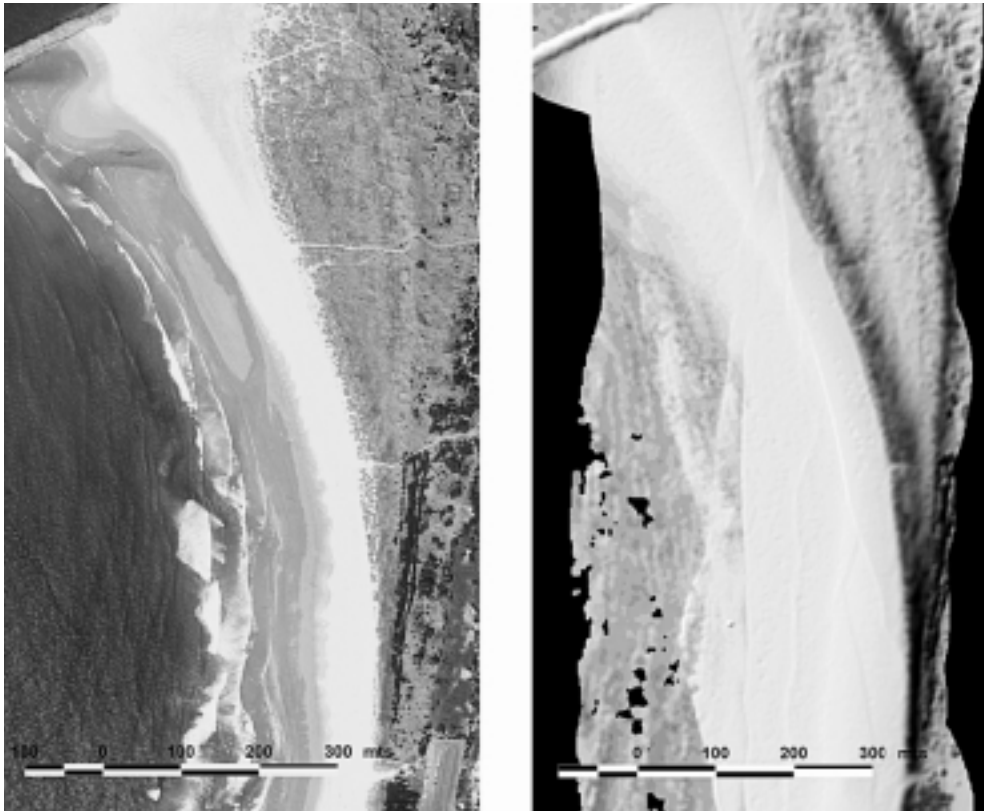


Figura 4. Ortofoto y modelo digital de terreno obtenido con un altímetro láser aerotransportado (precisión altimétrica 16 cms). La imagen ha sido procesada en el Departamento de Geografía de la Universidad de Sevilla con los datos suministrados por el Coastal Service Center (NOAA) (Mrs. Margaret A. Davison) a quien agradecemos su colaboración.

La medición de los cambios y el cálculo de las tasas de erosión

Una vez la línea de costa para varias fechas ha sido identificada, la medición de los cambios exige el establecimiento de un procedimiento metodológico que permita su comparación y medición geométrica. Este simple procedimiento de comparación no es un tema banal cuando la línea de costa se ha extraído de documentos o con instrumental técnico que poseen su propia geometría, derivada de un sistema de proyección para la cartografía, de la perspectiva cónica para la fotografía, del sistema de adquisición para la imágenes de satélite y el sistema LIDAR y del sistema de referencia geométrico para los levantamientos topográficos y GPS.

Los procedimientos metodológicos para pasar de un sistema de referencia geométrico a otro están perfectamente definidos, pero hasta muy recientemente estaban ligados a tediosos procedimientos óptico/mecánicos y laboriosos cálculos matemáticos. La forma más simple

de solventar este problema, en las primeras aplicaciones, ha sido el establecer una serie de elementos fácilmente reconocibles en las fuentes de información y, tras el establecimiento de la escala de los documentos, medir la distancia entre estos elementos y las líneas de costa seleccionadas. La debilidad de este método se revela en varios puntos: (i) la existencia de estos elementos reconocibles, a veces difíciles de encontrar y, cuando existen, puede que su distribución espacial no se adapte adecuadamente a la extensión de la zona de estudio (concentración en algunos sectores y ausencia en otros); (ii) el concepto de escala no es homogéneo en un documento cartográfico (depende de centro de proyección) ni en la fotografía aérea (depende de la altura), ni en las imágenes de satélite (relación IFOV/píxel); y (iii) el carácter discontinuo y puntual de las medidas.

La incorporación de la electrónica y la informática en las técnicas cartográficas, la restitución fotogramétrica, el tratamiento digital de imágenes y los SIGs, ha puesto en nuestras manos un conjunto de herramientas informáticas que permiten de forma bastante precisa pasar cualquiera de estos documentos a un sistema de referencia común. Básicamente, cuando se trata de un documento cartográfico o datos basados en un sistema de proyección, la mayor parte de estas herramientas permiten realizar cambios de proyección cartográfica; cuando el documento se digitaliza en formato *raster* o se suministra en este formato, existen procedimientos de corrección geométrica utilizando puntos de control homólogos (rectificación geométrica), obteniéndose resultados más precisos con la ayuda de modelos digitales de elevaciones (MDEs). En el caso de la fotografía aérea, la restitución fotogramétrica permite corregir las deformaciones inherentes a la perspectiva cónica fotográfica, errores que no soluciona el procedimiento anterior. El propio proceso de restitución ha pasado de ser analógico a analítico, para finalmente ser totalmente digital en nuestros días, con lo cual resulta bastante asequible obtener líneas de costa en un sistema de proyección determinado a partir de pares estereoscópicos o, incluso, se ha abaratado espectacularmente la posibilidad de generar ortofotos por procedimientos digitales. En el caso de la topografía clásica, el GPS o el sistema LIDAR, los datos se entregan con sistema de referencia conocido e incluso el propio equipamiento instrumental incorpora utilidades para cambiar a cualquiera de los sistemas de referencia más utilizados.

Una vez todas las líneas de costa pasadas comparten un mismo sistema de referencia geométrico (por ejemplo proyección UTM, con coordenadas para el mismo Huso), sólo es necesario un instrumental para medir la distancia lineal entre cada par de líneas de costa sucesivas. Hoy en día esta medición es realmente fácil de hacer con cualquiera de los programas informáticos de diseño gráfico (CAD), cartografía automática, tratamiento digital de imágenes o SIGs. Sin embargo, el hecho que tradicionalmente estas tasas de erosión se expresen en metros/año, exige que estas medidas sean puntuales, por lo que se selecciona un número de puntos representativos y se realizan las mediciones correspondientes (Fig. 5). Un aspecto especialmente sensible en esta metodología es el número de puntos, su distribución geográfica y la diferencia cronológica entre dos líneas sucesivas. Respecto al número de puntos, parece obvio que cuanto más numerosos sean mejor, pero la distancia entre ellos es también muy importante para recoger la variabilidad espacial de los procesos erosivos en la costa. Un método utilizado es dividir la costa en tramos longitudinales con características morfodinámicas parecidas y seleccionar varios puntos representativos para cada uno de ellos. Este método es paradójicamente bastante efectivo cuando la diferencia entre fechas es de varios años o décadas, ya que este periodo temporal filtra gran parte de la variabilidad

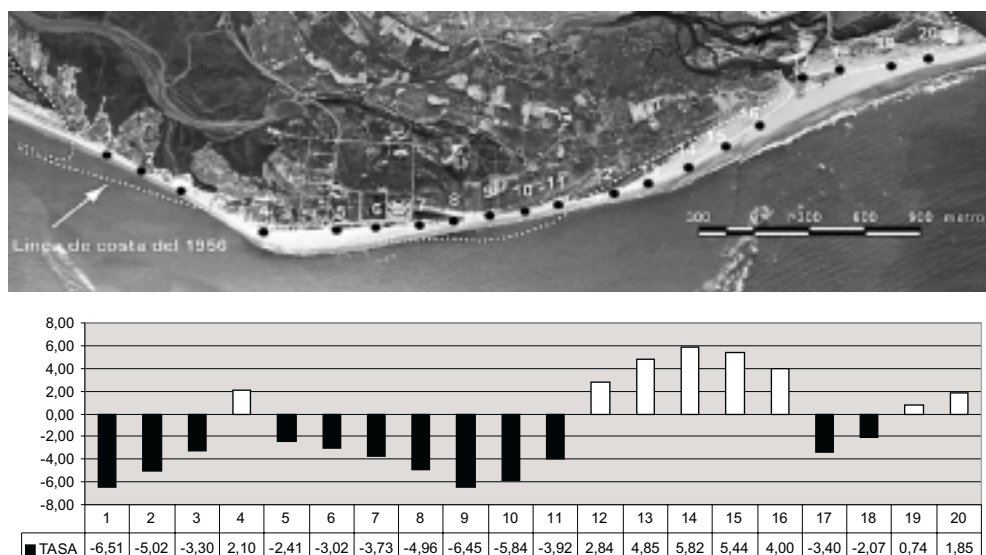


Figura 5. Fotograma de 1985 y línea de costa de 1956. Sobre ambos documentos se han realizado un conjunto de medidas puntuales para el cálculo de las tasas de erosión o progradación (gráfico inferior). La línea de costa utilizada fue el límite playa alta/duna costera (foreshore/backshore). Elaboración propia.

espacial de la erosión, si la línea de costa elegida permite soslayar el efecto de los cambios estacionales y eventos extraordinarios (línea de contacto *foredune/backshore*, por ejemplo). Sin embargo, cuando las fechas son muy próximas hay que extremar las precauciones, ya que al tratarse de medidas puntuales, si su distribución espacial no es muy densa puede verse muy afectada por procesos erosivos de carácter local. Es decir, aunque a largo/medio plazo, las costas erosivas retroceden de forma mas o menos homogénea, a escalas temporales cortas los procesos erosivos se pueden ver muy influenciados por fenómenos locales que «enfocan» el oleaje en algunos sectores específicos o por la presencia de formas rítmicas y móviles (*megacusps*, ondulaciones longitudinales) y, por lo tanto, las medidas pueden ser sustancialmente diferentes a escasas distancias. Esto hace que en las costas españolas sea aconsejable obtener los datos (topográficos, GPS o fotografía aérea) en una situación estival, ya que la costa ha podido restablecer su equilibrio tras los fenómenos extremos típicos de la etapa invernal (temporales, *storm surges*, etc.).

Una vez realizadas las mediciones es necesario extraer una tasa de erosión media (National Research Council, 1990). Una técnica simple es utilizar exclusivamente la primera y última fecha para calcular la tasa con estos dos únicos puntos de referencia mediante la división de la distancia entre las dos fechas por el número de años. Tendría a su favor el mayor recorrido temporal y expresaría la información de los cambios a largo plazo. Es una técnica útil y simple, siempre y cuando en este tramo costero no se hayan introducido cambios sustanciales, sobre todo de carácter antrópico, que hayan modificado su comportamiento dinámico (por ejemplo la construcción de diques o puertos que interrumpan el tránsito

sedimentario longitudinal). Si esto ha ocurrido es aconsejable dividir en dos periodos las tasas (antes y después), siempre que exista información disponible. El inconveniente es que despreciamos la información de las líneas de costa intermedias en el caso de que tengamos varias, y, por lo tanto, podemos desestimar la presencia de tendencias.

Un método más sofisticado es utilizar para cada punto todas las mediciones entre las fechas disponibles y ajustar a ellas una recta, mediante un análisis de regresión lineal. Este método tiene la ventaja de utilizar toda la información disponible, y permite revelar la existencia de una tendencia frente a la aceptación de que el comportamiento de la erosión es homogéneo a lo largo del todo el período. Por otra parte, la técnica de análisis es fácil de usar y susceptible de ser evaluada por numerosos tests estadísticos. Si en el tramo analizado encontramos una alteración antrópica como la comentada anteriormente, se suele realizar el análisis de regresión con dos grupos de datos (los anteriores y los posteriores a la fecha de la alteración antrópica).

Junto a esta forma de expresar las tasas de erosión (medidas puntuales expresadas en metros/año), la posibilidad de disponer de nuevas fuentes de información y el abaratamiento de los programas para su manipulación informática ha conducido a la expresión de las tasas de erosión en unidades diferentes. Basicamente como cambios superficiales ($m^2/año/metro$ de costa) y como cambios volumétricos ($m^3/año/metro$ de costa).

En el primer caso (cambios superficiales), la metodología exige una fuente de información que permita reconstruir las líneas de costa y tratarlas como una línea (no como medidas puntuales) y para ello las fuentes de información más utilizadas son la cartografía, la fotografía aérea, la teledetección y, de forma menor, los levantamientos topográficos (estación total o GPS). Los más utilizados, sin duda, son los dos primeros ya que tienen un mayor recorrido temporal retrospectivo. Como hemos indicado con anterioridad, la posibilidad de adaptar las fuentes originales, tras su digitalización, a un sistema de referencia geométrico común son utilidades que ofrecen la mayor parte de los programas informáticos para cartografía automática y fotogrametría digital a precios bastante asequibles y pueden ser soportados por cualquier procesador moderno en un PC. Tras la comparación de dos líneas de costa es fácil convertir el espacio erosionado o acumulado en un polígono y extraer su superficie para la elaboración de las tasas. Las ventajas de este enfoque metodológico son varias (Ojeda *et al.*, 2001). La primera es que de forma casi automática se pueden intersectar con líneas transversales a la costa (con una equidistancia a elegir por el investigador) y extraer las medidas puntuales para aplicar el método anterior. La segunda es la mayor precisión de las mediciones, la no pérdida de continuidad espacial y el valor implícito en los datos de superficie. Por último, esta técnica permite delimitar con mayor precisión dónde empiezan y terminan los tramos erosivos (Fig. 6).

Pero sin duda, dado que la erosión costera es en definitiva un proceso tridimensional (pérdida de sedimentos donde el retroceso lineal no es más que una de sus expresiones), la evaluación más precisa de sus efectos morfométricos sería el cuantificar el volumen erosionado y expresarlo en una tasa volumétrica ($m^3/año/metro$ de costa). Obviamente el problema de esta metodología reside en ser capaz de extraer la información altimétrica con la suficiente precisión. Para ello, la inmensa mayoría de la información cartográfica disponible en la mayor parte de las zonas costeras no es adecuada (equidistancia de curvas y densidad de cotas altimétricas insuficientes). Por lo tanto, si se quiere realizar un análisis con un periodo temporal extenso, la única información posible es la fotografía aérea, ya que a través de su



Figura 6. Isla Canela, desembocadura del Guadiana. Comparación de las líneas de costa de 1956 y 1985, extraídas de fotos aéreas. La superposición cartográfica en un entorno SIG, permite calcular la superficie erosionada y las áreas de progradación. La continuidad espacial permite identificar con precisión dónde comienzan los tramos erosivos (Elaboración propia).

restitución digital es hoy en día relativamente fácil extraer información altimétrica incluso para vuelos fotogramétricos antiguos (Baltasavias, E.P., 1996; Brown, D.G., *et al.*, 1999).

El proceso de restitución digital exige la disponibilidad de los fotogramas en formato digital (*.tif, por ejemplo), el *escaneo* de los fotogramas o, mejor, el de las diapositivas por su mejor calidad óptica y métrica. Los programas de restitución exigen adicionalmente disponer de los parámetros de la cámara utilizada (distancia focal al menos) y puntos de apoyo por fotograma o por bloques (aerotriangulación). En este sentido, los parámetros de la cámara suele poseerlos la empresa que realizó el vuelo, convirtiéndose los puntos de apoyo en la información más sensible y difícil de encontrar. La solución más factible y económica es tomarlos directamente con un GPS diferencial (D_GPS), por lo menos para los vuelos recientes. En el caso de que, para vuelos fotogramétricos antiguos sea difícil encontrar los mismos puntos de control, los sistemas de restitución actuales permiten la búsqueda semiautomática de cualquier punto con coordenadas x,y,z conocidas extraídos de las fotos más recientes y trasvasarlo (algoritmos de reconocimiento de patrones) a las fotos antiguas. Con esta información se realiza la orientación relativa y absoluta del modelo fotogramétrico y estamos en condiciones de restituir la información altimétrica. Este proceso puede hacerse interactivamente por un operador/técnico (curvas de nivel o cotas) o automáticamente (proceso conocido por estereocorrelación). Este procedimiento de estereocorrelación (sintéticamente consiste en encontrar automáticamente los píxeles análogos en los pares estereoscópicos y medir su paralaje que es, finalmente, transformado en un valor altimétrico) es especialmente útil, ya que proporciona información altimétrica para una malla de puntos tan detallada como el tamaño del píxel del fotograma, pero no está exento de problemas (presencia de vegetación, puntos análogos erróneos en superficies homogéneas, etc.). Por todo ello, la edición manual posterior de la información altimétrica es esencial antes de crear el modelo digital de elevaciones (MDE) con el que calcularán los volúmenes. Por otra parte, la precisión en la «z» está controlada básicamente por la escala del vuelo, aunque con vuelos en torno a 1:20.000 se consiguen precisiones alrededor del 1-2 metros. Una vez obtenidos los MDEs para varias fechas, la utilización de técnicas del álge-

bra de mapas (en un entorno SIG) permite obtener el balance sedimentario para cada punto de la malla altimétrica y, por lo tanto, las tasas de erosión volumétricas expresadas en $m^3/año/metro$ lineal de playa (Fig. 7).

Obviamente las técnicas topográficas clásicas y el D_GPS permiten llegar a evaluaciones parecidas a través de la realización de perfiles transversales, sin embargo su utilización está asociada a escalas muy detalladas y siempre existe el inconveniente de la discontinuidad espacial de la información (distancia entre los perfiles). Quizás la técnica de mayor proyección en el futuro, ya en fase operativa en algunos países (Huising, J. y Vaessen, 1997), es el uso del anteriormente comentado sistema de altimetría láser aerotransportado (Lidar). En este caso, la información proporcionada es directamente un MDE de bastante precisión (decenas de centímetros) y, dado el control geométrico del sistema de adquisición (navegación inercial y D_GPS), se suele proporcionar en el sistema de referencia que elija el cliente (Fig. 8). La obtención de datos para varias fechas permite realizar igualmente el balance sedimentario y el cálculo de las tasas volumétricas. Este sistema tiene a su favor la posibilidad de filtrar la vegetación (el barrido lateral es tan detallado que siempre existen algunos puntos que proporcionan la información del suelo entre una formación vegetal), la precisión altimétrica y la

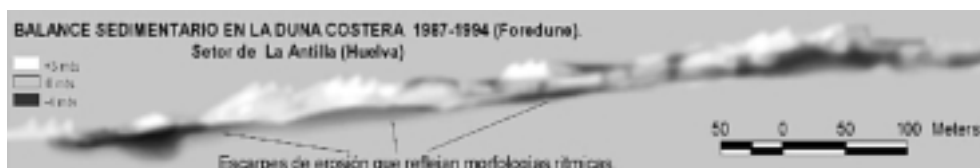


Figura 7. Balance sedimentario tras la realización de dos MDEs a través de fotogrametría digital y D_GPS. Este tipo de análisis permite identificar cuánto sedimento se pierde o gana entre la fechas de referencia, así como conocer donde se concentran los cambios (Ojeda, *et al.*, 2001).

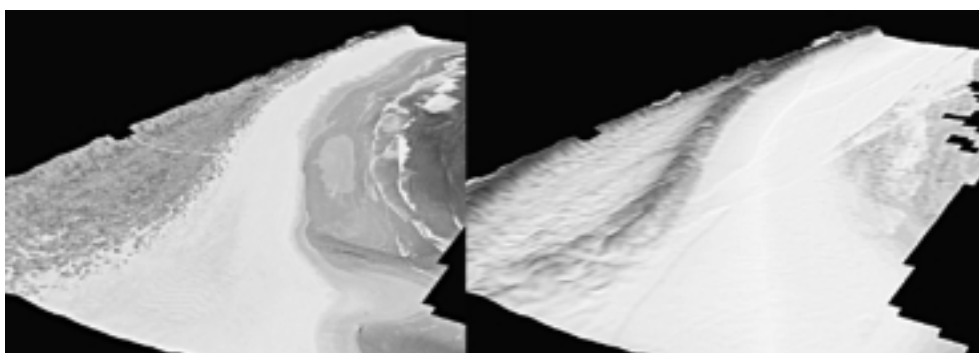


Figura 8. Vista tridimensional de la ortofoto y el modelo digital de elevaciones de la fig. 4. La precisión altimétrica del sistema Lidar utilizado es de 0.16 m. Elaboración propia a partir de los datos suministrados por el Coastal Service Center (NOAA).

fácil manipulación de los datos proporcionados en formato *raster* (MDEs). Sin embargo, es una técnica sin posibilidad retrospectiva por falta de datos antiguos.

El interés adicional de estas metodologías (fotogrametría digital y LIDAR) reside en que el «dato» de trabajo es finalmente un MDE, con lo cual no solo es interesante desde la perspectiva de la elaboración de tasas, sino que además proporciona la información esencial para la evaluación de otro riesgo que suele presentarse asociado a la erosión costera: la inundación.

3. LA CARTOGRAFÍA DE LA PELIGROSIDAD NATURAL Y EL CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD

Calculadas las tasas de erosión (en cualquiera de sus expresiones) la evaluación completa del riesgo implica la cartografía de esta peligrosidad natural tanto actual como futura, así como la utilización de esta cartografía para identificar los daños que pueden ser causados por este fenómeno (pérdidas de playas, propiedades, daños a infraestructuras, etc.). Básicamente en la actualidad se utilizan dos enfoques metodológicos: el análisis de tendencias históricas y la modelización numérica.

Análisis de las tendencias históricas

Este enfoque metodológico se sustenta en el cálculo de las tasas de erosión pasadas y en proyectar éstas hacia el futuro (Crowell, N. y Leatherman, S.P., 2000). Lógicamente los resultados de este análisis son dependientes del sistema elegido para obtener las tasas (tasa media para las fechas extremas o para todas las fechas, el ajuste de las medidas de erosión a una recta de regresión...) y del número de puntos para los que obtenemos las tasas (representatividad espacial de los puntos o los cálculos medios para tramos con características homogéneas). El proceso metodológico es simple ya que consiste en calcular la posición de la costa en 20, 30 ó 60 años haciendo retroceder la costa la distancia correspondiente a la tasa calculada multiplicada por el número de años a proyectar. Este método parte de la hipótesis de que el comportamiento de la costa será igual en el futuro que el constatado en el pasado y, por lo tanto, no se necesita más que proyectar la posición de la costa linealmente. En el caso que algún factor nuevo necesitase incluirse en la proyección por una evidente modificación morfodinámica respecto al pasado (aceleración de la subida del nivel del mar) habría que calcularlo e introducirlo en la proyección. Este método tiene a su favor su simplicidad y la facilidad de aplicarlo a cualquier punto de la costa (Federal Emergency Management Agency, 2000) y parece reflejar de forma bastante correcta los cambios a escalas espacio-temporales a largo plazo. Una vez obtenida la nueva línea de costa, la identificación de elementos o zonas afectadas es fácil de realizar en un entorno SIG, mientras su cuantificación económica exige un trabajo de campo adicional.

Modelización numérica

Para escalas espacio-temporales cortas, y especialmente para tramos costeros ocupados por formaciones arenosas (playas y dunas), se han producido durante los últimos años sustanciales avances en la modelización numérica para la predicción de la evolución de la línea de costa (Losada, I.L. *et al.*, 1995; Sánchez Arcila, A. y Jiménez, J.A., 1995).

Estos métodos exigen, en cambio, un gran volumen de información de partida, ya que necesitan de la existencia de una modelización previa del transporte litoral (modelos numéricos de transporte), idealmente en todas las direcciones. Para ello, es necesario disponer de información hidrodinámica (oleaje y marea), así como de información batimétrica para modelizar la propagación del oleaje y las mareas en aguas someras, el cálculo de corrientes y, finalmente, de información sedimentológica para el cálculo final del transporte. Si esta información está presente y se dispone del *software* y *hardware* necesario se puede elegir básicamente entre dos aproximaciones metodológicas (aunque existen muchas variantes):

Modelos de líneas: En estos casos, predicen la evolución de una o N líneas a largo plazo, considerando las variaciones a corto plazo (temporales) como perturbaciones despreciables frente a la tendencia general (se modelizan situaciones medias o modales). Estos métodos modelizan fundamentalmente el transporte transversal en áreas de pequeñas dimensiones, por lo que son muy sensibles al establecimiento de las condiciones de contorno para el modelo, máxime en costas extensas y expuestas a un oleaje que genere transporte longitudinal de importancia. Es muy utilizado para la predicción de la evolución de playas arenosas y en la incidencia de obras de infraestructura costera (diques, regeneración...).

Modelos de malla: en estos casos, sobre una malla definida sobre el espacio a modelizar, y con los resultados de los modelos de propagación, corrientes y transporte, se calcula la variación del fondo en cada punto de la malla para un intervalo de tiempo determinado. Los resultados de este análisis pueden servir como «input» para modelizar un nuevo periodo y así sucesivamente. Posteriormente se podría pedir al sistema la posición de la línea de costa para una fecha determinada y utilizarla en un entorno SIG para la evaluación de la vulnerabilidad.

Los resultados de los modelos numéricos son bastante aceptables cuando las escalas espacio-temporales de análisis son pequeñas (áreas detalladas y periodos de tiempo cortos). De hecho, las ecuaciones para la modelización hidrodinámica están bastante bien desarrolladas y son de gran complejidad (propagación del oleaje y cálculo de corrientes), sin embargo, los modelos de transporte sedimentario son más simples y necesitan un mayor refinamiento. A escalas temporales mayores nos encontramos, además, con la dificultad de modelizar correctamente la secuencia de eventos, dada la no linealidad de los procesos litorales. Es decir, no obtendremos los mismos resultados al modelizar un temporal y después un mes de oleaje de baja energía, que primero un mes de oleaje de baja energía y después un temporal. Esta dificultad cuestiona en parte la aplicabilidad de estos métodos para la previsión a largo plazo en modelos deterministas (Thieler, E.R., *et al.*, 2000), aunque durante los últimos años se está incorporando a la modelización numérica las técnicas de análisis estocástico (National Research Council, 1990, 133). En cambio, son muy utilizados para la evaluación de las tasas de retroceso en eventos extremos (temporales, ciclones,...). Por todo ello podríamos afirmar que, dado el volumen de datos de partida necesario, la necesidad de mejorar los modelos de transporte y evolución, así como la enorme capacidad de cálculo requerida para modelizar a largo plazo, son métodos que se aplican con carácter muy localizado y para escalas temporales cortas.

4. CONCLUSIONES

Parece obvio que los daños causados por los riesgos de erosión y su evidente aceleración, ligada al incremento de la peligrosidad natural (por alteración antrópica de la dinámica sedi-

mentaria o por los efectos de la esperada subida del nivel del mar debido al calentamiento terrestre) y, sobre todo, al aumento de la vulnerabilidad por la creciente ocupación antrópica de la zona litoral, exigen una reflexión científica sobre los procesos de evaluación y un estudio detallado de las fuentes de error. Esta necesidad no sólo se justifica por las pérdidas ocasionadas, sino también por la creciente incorporación de los riesgos naturales en los procedimientos de planificación territorial y urbanística, así como en la práctica habitual de diferentes organismos de la administración (Protección Civil, Dirección General de Costas,...) e instituciones privadas (compañías de seguros). De hecho, este riesgo natural ha llevado a algunas naciones a definir metodológicamente tanto los procedimientos para su evaluación (Ministry of Transport and Public Works, 1990, FEMA, 2000) como las técnicas empleadas para su proyección hacia el futuro, así como a establecer periódicamente la revisión de sus cálculos.

Desde esta perspectiva metodológica, parece obvio que los dos métodos clásicos (análisis de tendencias históricas y modelización numérica) tienen plena vigencia debido a su carácter complementario (depende de las escalas espacio-temporales de análisis), aunque es necesario definir y establecer criterios claros para la aplicación de las metodologías (definición de línea de costa, escalas, análisis de las series históricas, fuentes de error, ...) y poder comparar resultados. Desde esta perspectiva, parece que en el futuro, y así se deduce de la decisión tomada por diferentes países con larga tradición en los estudios sobre erosión costera (Países Bajos, Estados Unidos...), las fuentes de información mejor adaptadas a la evaluación de este riesgo son la fotogrametría digital en combinación con D_GPS y la altimetría láser aerotransportada (Lidar), ya que permiten obtener cualquier tipo de tasa de erosión, no pierden continuidad espacial y proporcionan información altimétrica de precisión (MDEs), una variable de uso múltiple en la zona costera (riesgos de inundación, modelización numérica, etc.).

BIBLIOGRAFÍA

- BALTASAVIAS, E.P. (1996): «Digital ortho-images –a powerful tool for the extraction of spatial -and geoinformation». *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 51. págs. 63-67.
- BROWN, D.G. AND ARBOGAST, A. (1999): «Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan». *Journal of Photogrammetric, Engineering and Remote Sensing*. Vol. 65, nº 4, págs. 446-447.
- CROWELL, N., AND LEATHERMAN, S.P. (2000): *Coastal erosion mapping and management. Journal of Coastal Research. Special issue*, 28. págs. 196.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (2000): *Evaluation of erosion hazards*. Informe realizado por el John Heinz III Center for Sciences, Economics and the Environment.
- HUISING, J. AND VAESSEN (1997): «Láser scanning in the Netherlands: from experimenting to large scale operational use». *EARseL*, Newsletter, págs. 5-12.
- INTERGOVERNMENTAL PANNEL ON CLIMATE CHANGE (1995): *Climate Change. Second Scientific Assessment*. Cambridge University Press.
- INTERGOVERNMENTAL PANNEL ON CLIMATE CHANGE (2001): *Climate Change. Third Scientific Assessment*. Obtenido de www.ipcc.ch.

- LECHUGA, A. (1995): «Problemas y técnicas de prevención en dinámica litoral aplicadas a España». En: *Reducción de los riesgos geológicos en España*. ITGME. págs. 123-131.
- LOSADA, I.L. et al. (1995): «Modelos hidrodinámicos y transporte de sedimentos». *Revista de Ingeniería del Agua*. Vol. 2, págs. 99-118.
- MINISTRY OF TRANSPORT AND PUBLIC WORKS (1990): *A new coastal defense policy for the Netherlands*. Ministry of Transport and Public Works. La Haya. págs. 103.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1987): *Responding to changes in sea level: engineering implications*. National Academy Press. Washington. págs. 145.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1990): *Managing coastal erosion*. National Academy Press, Washington.
- OJEDA ZÚJAR, J. (1988): *Aplicaciones de la Teledetección espacial al estudio de la dinámica litoral (Huelva): Geomorfología y Ordenación Litoral*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- OJEDA ZÚJAR, J. y VALLEJO VILLALTA, I. (1995): «La Flecha de El Rompido: modelos de evolución durante el periodo 1943-1991». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8 (3):229-237.
- OJEDA, J.; BORGNIET, L.; PÉREZ, A. Y LODER, J. (2001): «Monitoring coastal morphological changes using topographical methods, softcopy photogrammetry and GIS, Huelva (Andalucía, Spain)». En: *Coastal and Marine GeoInformation Systems: applying the technology to environment* (ed. Green, D. and Smith, J.S.). Cap. 36. Elsevier. (en prensa).
- PARDO PASCUAL, J.E. (1991): *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. Ed. Generalitat Valenciana. Conselleria d'Obres Publiques, Urbanisme i Transports. Valencia.
- SÁNCHEZ ARCILA, A. y JIMÉNEZ, J.A. (1995): «Evolución en planta/perfil de una playa. Métodos predictivos». *Revista de Ingeniería del Agua*. Vol. 2, págs. 119-132.
- STUMPF, R.; MORGAN, K.; PETERSON, R.; KROHN, M.D. AND SALLENGER, A.H. (1999). «Mapping Impacts of Hurricanes Fran and Bertha on the North Carolina Coast». *Coastal Sediments '99*. Págs. 1826-1835.
- THIELER, E.R.; PILKEY, O.; YOUNG, R.; BUSH, D.; CHAI, F. (2000): «The use of Mathematical models to predict beach behavior for U.S. coasta engineering: A critical review». *Journal of Coastal Research*. nº 16,1, págs. 48-70.
- VICIANA MARTÍNEZ-LAGE, A. (1998): *La erosión antrópica en las acumulaciones sedimentarias del litoral almeriense*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

Páginas Web de interés:

<http://www.toposys.com/images/>
<http://coastal.er.usgs.gov/lidar/>
<http://www.toposys.com/>
<http://www.csc.noaa.gov/beachmap/>
<http://www.heinzcenter.org/>
<http://www.fema.gov/>
<http://www.ipcc.ch/>
<http://www.geo.tudelft.nl/frs/laserscan/>
<http://telsat.belspo.be/satellites/Satellites.asp>