

LA IMPORTANCIA DEL MONITOREO DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Por:
Javier León Patiño

Introducción

El litoral es más que una unidad o límite observable. Cuando se habla del medio litoral, se hace referencia a una orla de amplitud variable, cuyos límites son difíciles de precisar[1]. Gran parte de los autores coinciden en que el espacio litoral es la zona de contacto que la tierra, atmósfera y el mar tienen en la actualidad[2], una compleja zona ambiental de gran importancia para el hombre[3]. La línea de costa delimita esta zona de contacto dinámica entre el mar y el continente caracterizada por ser un medio complejo, que engloba tantos mecanismos generales del modelado, como procesos específicos[4].

Dependiendo de las circunstancias, el movimiento de aguas por las olas, mareas, tormentas, corrientes litorales, y últimamente el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático, se combinan e interactúan con el continente[5] para dar como resultado una serie de procesos costeros erosivos o deposicionales. La línea de costa está expuesta a esta serie de procesos únicos que determinan la evolución de su forma. Un estudio global de la energía de las olas y corrientes en zonas costera, demostró que existe 58000 veces más energía disponible para transportar arena y sedimentos finos en ambientes marinos cercanos a la orilla, que sedimentos disponibles para ser transportados[6].

El litoral es también un importante área de asentamientos humanos. Los humanos han ocupado esta zona por una gran cantidad de razones que van desde la extracción de recursos que se encuentran en aguas poco profundas, como pescados, mariscos y aves marinas; al uso de la línea de costa como una base para los barcos pesqueros, comerciales y de transporte; a una zona de defensa en épocas de guerra; y también como un importante espacio de recreación, ofreciendo sus playas a miles de personas para el descanso o la práctica de deportes[7].

En el Perú, la ocupación del litoral se remonta al año 7000 AC. Según los principales historiadores peruanos, los primeros sedentarios en establecerse en esta zona fueron hombres andinos que bajaban de la sierra en la época seca y se establecían en las lomas aprovechando las garúas invernales y los recursos costeros como las conchas y otros mariscos[8]. Actualmente, más de la mitad de la población peruana, 52.3%, viven a menos de 50km de la línea de costa, es decir, en el 8.8% del total del territorio. Estadísticas similares se reflejan a nivel mundial.

Las actividades humanas pueden tener significativos impactos en el manejo de las costas, hasta el punto de degradarlas ambiental y socio-económicamente[9]. La continua presión sobre las zonas costeras, sobretodo por la urbanización de playas o construcciones de obras civiles como puertos o carreteras, han expuesto los problemas acarreados por los cíclicos periodos erosivos o deposicionales de las playas. Los intentos de estabilizar este dinámico sistema han traído consecuencias negativas en la mayoría de los casos, ya que paradójicamente, las obras de ingeniería costera pueden proteger temporalmente las obras civiles, pero contribuyen con la erosión o el arenamiento de las playas aguas abajo o arriba[10].

La variación de la línea de costa

Durante las últimas décadas, el desarrollo de las poblaciones en el litoral se ha incrementado drásticamente. La tendencia es que este patrón continúe en el futuro sin detenerse[11]. Los resultados conflictivos de este desarrollo se vienen haciendo cada vez más evidentes, expresados en las pérdidas de construcciones e infraestructura cercana a la línea de costa. La planificación y el ordenamiento territorial de zonas costeras se han hecho imprescindibles, sobretodo ante un inminente incremento en el nivel medio del mar, el cual acelera los procesos de erosión marina, generando un rápido retroceso de la línea de costa.

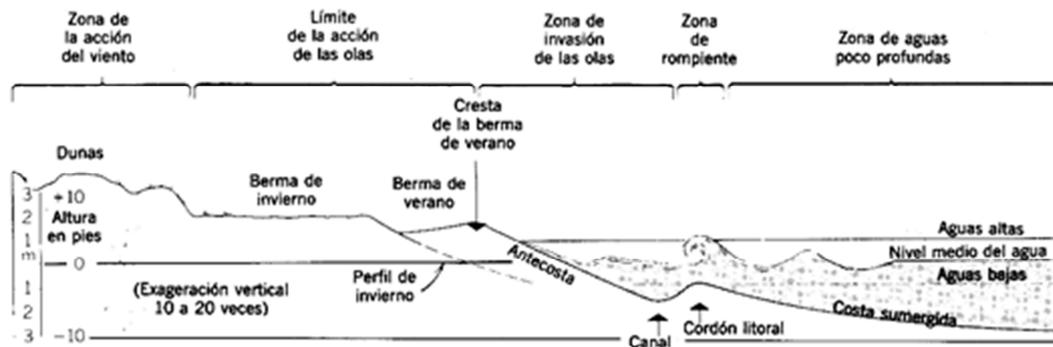


Figura 1. Modelo de playa y sus formas (Tomado de Strahler, A. 1997)

Países con importantes centros urbanos expuestos a esta variación de la línea de costa y a las grandes pérdidas económicas resultantes, se han visto en la necesidad de crear organismos ad hoc que evalúen y cuantifiquen las tasas de erosión costera como la Agencia de Manejo Federal de Emergencia (FEMA) en Estados Unidos[12] o la Conferencia Activa de Problemas Asociados a la Línea de Costa (SCOPAC) en el Reino Unido[13].

El objetivo principal del monitoreo permanente de la línea de costa es el de entender el patrón de los ciclos erosivos / deposicionales de un determinado sector de costa, para poder manejar datos de predicción confiables que pueden ser luego incorporados en las políticas de planificación de usos de suelo como "áreas de peligro de erosión". Usualmente se establecen regulaciones para las construcciones costeras basadas en el retroceso de la línea costera según los promedios anuales de tasas de erosión para 30 y 60 años[14].

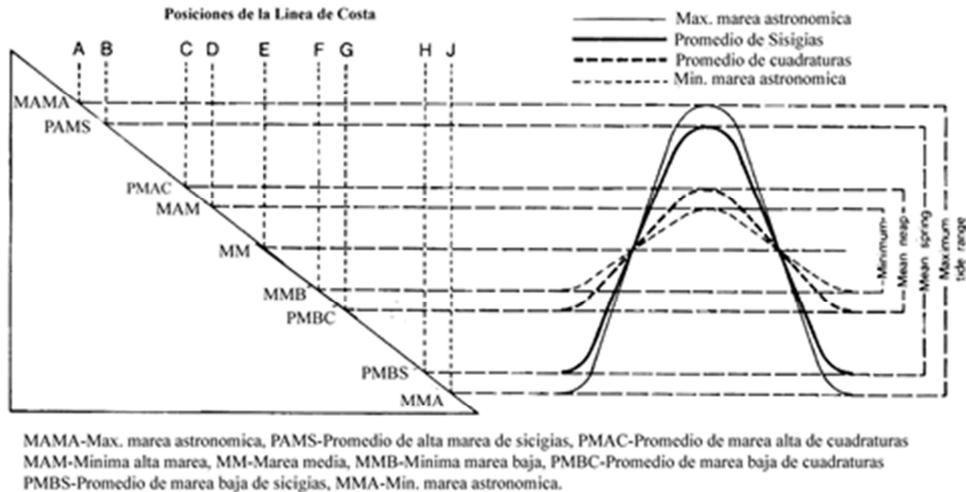
Determinación de la evolución de la línea de costa

Para determinar la evolución de la línea de costa de un sector, existen diversas metodologías. La más común, por su simplicidad y bajo costo, es la de evaluar un sector de la playa cualitativamente a través de un lapso de tiempo (estacional, anual, etc.). La morfología de una playa es un indicador indirecto de las condiciones de los procesos costeros. Estudiando las formas de la playa como la berma, barras o cordón, cúspides, pendiente de la playa, etc.(ver Figura 1), se puede determinar, a grandes rasgos, la tendencia de la evolución de la línea de costa.



Figura 2: Perfil de playa utilizando balizas de Emary

El monitoreo de la línea de costa utilizando perfiles de playa, siguiendo la metodología de Emary[15], es otra herramienta muy popular de bajo costo y precisión aceptable, ya que no usa más que dos balizas y un nivel. Se elaboran transectos perpendiculares a la línea de la costa a lo largo de un sector de playa, en los cuales se mide la variación topográfica, como se muestra en la figura 2. El constante monitoreo de los mismos perfiles (mensualmente o menos), dan como resultado una serie de datos que muestran la evolución de la línea de costa y de la playa, tanto en dos, como en tres dimensiones (variación planimétrica y volumétrica). El uso de instrumentos como teodolitos o estaciones totales, aumenta notablemente la precisión de los resultados, pero también los costos.



A-J Max. ancho de litoral. B-H Promedio de mareas de sisigias. C-G promedio de mareas de cuadraturas. D-F Min ancho.

Figura 3. Datums posibles, según las mareas, para la línea de costa (Tomado de Bird, E. 2000)

Sin embargo, la complejidad y dinamismo de la línea costera, obliga a un monitoreo más estricto y estandarizado. La metodología contemplada por la FEMA para determinar los promedios anuales de tasas de erosión son calculados de una base de datos digital que consiste en las posiciones históricas de las líneas de costa, digitalizadas de mapas y/o fotos aéreas[16], así como también levantadas topográficamente o, recientemente, con tecnología radar (LIDAR) o de posicionamiento global (GPS)[17].

El mapeo de la línea de costa

El primer punto a considerar cuando se debe mapear una línea de costa, es las fuentes con las que se cuentan. Las dos fuentes principales que se deben de usar para digitalizar líneas de costa históricas son los mapas a gran escala (mayor de 1/25 000) y las fotografías aéreas de mediana a gran escala (mayor de 1/20 000). El uso de imágenes satélites, aunque de mayor costo, es de gran utilidad también, sobretodo por los constantes avances de la tecnología que permiten cada vez mayores resoluciones espaciales y temporales. Independientemente, cada fuente tiene ciertas ventajas y desventajas que deben ser evaluadas.

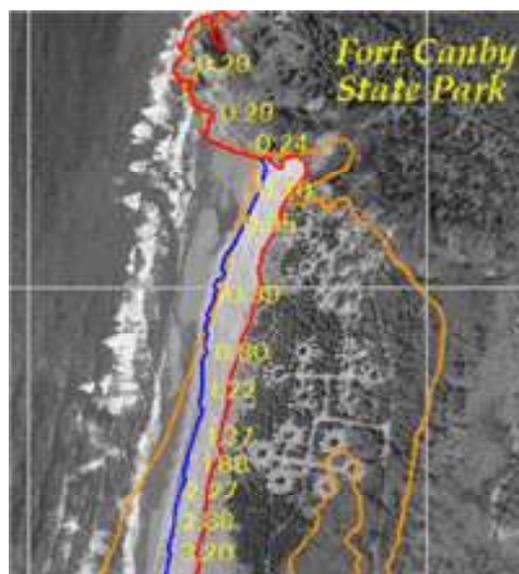
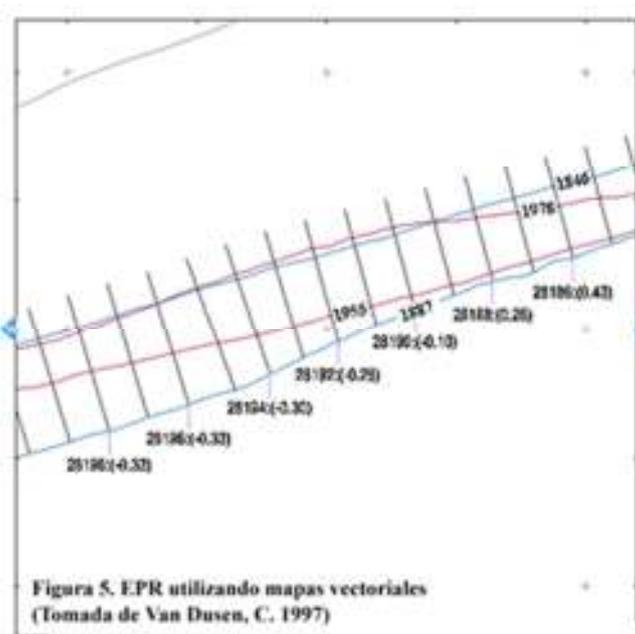


Figura 4. EPR utilizando foto aérea (Tomado de Daniels, R. 1998)

En el caso de los mapas históricos, cuando estos existen, los problemas más recurrentes son la falta de precisión debido a métodos de levantamiento obsoletos, discordancia de datums con los utilizados actualmente y deformaciones. Para extraer la línea de costa de una manera precisa, es necesario corregir estos problemas utilizando funciones de transformación geométrica como las funciones polinomiales de primer o segundo orden[18]. La mayoría de paquetes de mapeo por computadora y los sistemas de información geográfica (SIG), simplifican este proceso enormemente.

Por otro lado, las fotografías aéreas, por lo general, se encuentran con más frecuencia temporal y a mayores escalas. Los problemas que resultan de esta fuente son la cantidad de fotos individuales que se deben de usar para un área de tamaño considerable y las distorsiones innatas que llevan. Las fotos aéreas no tienen una proyección geoméricamente correcta como los mapas, y por ende, las relaciones geométricas dentro de una foto no son parejas. Para resolver este problema, deben de ser corregidas y rectificadas para poder compararlas con mapas planimétricos[19].

El segundo punto a considerar en este proceso de mapeo, es el elemento mismo a mapear. Regresamos nuevamente al problema del dinamismo de nuestro elemento a mapear, es decir, la línea de costa. Existe un potencial número de datums o elementos geomorfológicos que pueden ser usados para monitorear la variación de la línea de costa[20].



Como vemos en la figura 3, existen 9 posiciones cíclicas de mareas que pueden ser utilizados como indicadores de la línea de costa, además de elementos como la base de acantilados, peñas, dunas, etc. De estos indicadores, la línea de alta marea es considerada como el mejor indicador, por la mayoría de los investigadores. Las ventajas de usar la línea de alta marea como indicador es su fácil ubicación en el campo y en las fotografías aéreas (cambio de tonalidad)[21]. En el Perú el datum utilizado comúnmente es el nivel medio de bajamares de sicigias ordinarias (posición H en la Figura 3).

Una vez resueltos los problemas por deformación en ambas fuentes y la determinación y reconocimiento preciso del datum a usar como línea de costa, se procede a extraerla digitalmente. Las maneras de digitalizar actualmente se dan de dos maneras. La primera es con el uso de tableros o mesas digitalizadoras y la segunda es de modo directo, es decir, utilizando una imagen digital de fondo (mapa o foto "escaneada"). Este último modo es el más común debido a su mayor precisión en los resultados.

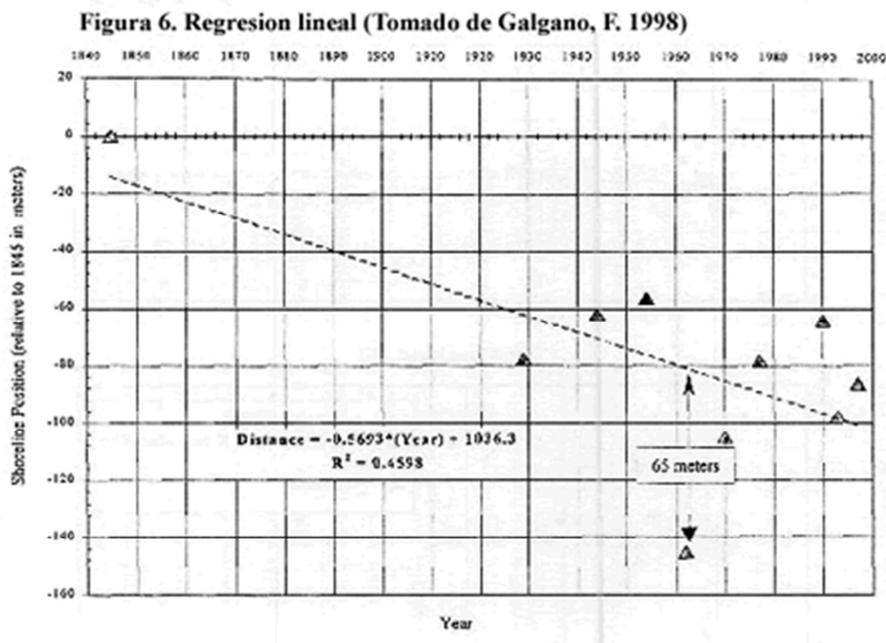
Tasas de erosión anuales

La cuantificación de la variabilidad de la línea de costa, expresada en tasas de erosión / deposición anuales, depende de la precisión del mapeo de la línea de costa y la frecuencia con la que se da a través del tiempo.

Los tres algoritmos más utilizados para predecir la posición de la línea de costa son el método de "end-point-rate" (tasa-punto-final) o EPR, la regresión lineal y una técnica de modelamiento estadístico conocida como descriptor mínimo de longitud (MDL)[22].

El más simple de utilizar es el método EPR, el cual consiste en comparar la distancia entre dos líneas de costa por segmentos y dividirla por la cantidad de años. En la figura 4 podemos ver un análisis EPR utilizando una foto aérea entre una línea de costa antigua (roja) y una actual (azul). La figura 5 nos muestra la misma técnica realizada con dos mapas.

En cuanto a las técnicas estadísticas, la regresión lineal resulta en la mayoría de los casos la técnica más precisa. Aunque las predicciones hechas con el MDL, un modelo polinomial de orden superior, pueden ser mejores, cuando no son buenas, pueden ser extremadamente imprecisas[23]. En la figura 6 podemos ver un análisis de regresión lineal que se ajusta muy bien al comportamiento cíclico, aunque con tendencia erosiva, de la línea de costa a lo largo de 160 años.



Discusión

La posición de la línea de costa está dentro de los denominados "geoindicadores", una serie de medidas (magnitudes, frecuencias, tasas y tendencias) sobre procesos geológicos que ocurren en o cerca de la superficie terrestre y que son relevantes para entender cambios ambientales en periodos menores a 100 años. Los geoindicadores han sido desarrollados utilizando parámetros estándar de la geología, geoquímica, geofísica, geomorfología, hidrología y otras ciencias de la tierra, y muchos de ellos son relativamente simples y económicos de aplicar[24].

El monitoreo constante de la línea de costa nos acerca a un mejor entendimiento de los patrones cíclicos de erosión y deposición a través del tiempo, permitiéndonos desarrollar pronósticos mejores y más confiables.

De los métodos utilizados para evaluar la evolución de la línea de costa, aquellos cualitativos nos dan sólo una idea global del estado actual de los procesos costeros que condicionan a la línea de costa. No resultan recomendables por sí solos, ya que los resultados obtenidos no permiten una comparación ni correlación aceptable con otros datos. Estos procedimientos resultan accesorios a métodos más cualitativos.

La labor de monitorear la variación de la línea de costa cualitativamente se ha facilitado en los últimos años gracias al avance y expansión de la teledetección y a los sistemas de información geográfica (SIG). El monitoreo de la línea de costa incluye tanto el uso de imágenes satélites, como el de fotografías aéreas. Esto permite el rápido levantamiento de grandes zonas, las cuales son fácilmente mapeadas y comparadas en el tiempo[25].

El mapeo de la línea de costa mediante estas técnicas, está condicionado principalmente por la disponibilidad y precisión de las fuentes (mapas, fotos, imágenes satélites, etc.). Por un lado, los mapas a gran escala que son necesitados para esta labor, no siempre corresponden a todo el litoral. En el caso peruano, sólo las zonas con puertos importantes son mapeadas a gran escala por la Dirección de Hidrografía y Navegación y Navegación (DHNM). Otras fuentes importantes de mapas a gran escala, como el Instituto Geográfico Nacional o diferentes proyectos de ministerios, como el Proyecto Especial de Titulación de Tierras (PETT) del Ministerio de Agricultura, no siempre cuentan con bases de datos actualizadas o cubren la entera zona del litoral peruano.

Por otro lado, la utilización de fotografías aéreas beneficia al usuario por la disponibilidad de series más frecuentes en el tiempo. Por ejemplo para la zona del valle de Moche-Trujillo, el Servicio de Aerofotografía Nacional (SAN) cuenta con diferentes series a gran y mediana escala, como se aprecian en la tabla I. Sin embargo, la dificultad en su uso, reside en el costo que implica corregirlas geoméricamente y rectificarlas (establecimiento de una red de puntos de control, estación fotogramétrica, etc.), procedimientos necesarios para poder determinar mediciones precisas.

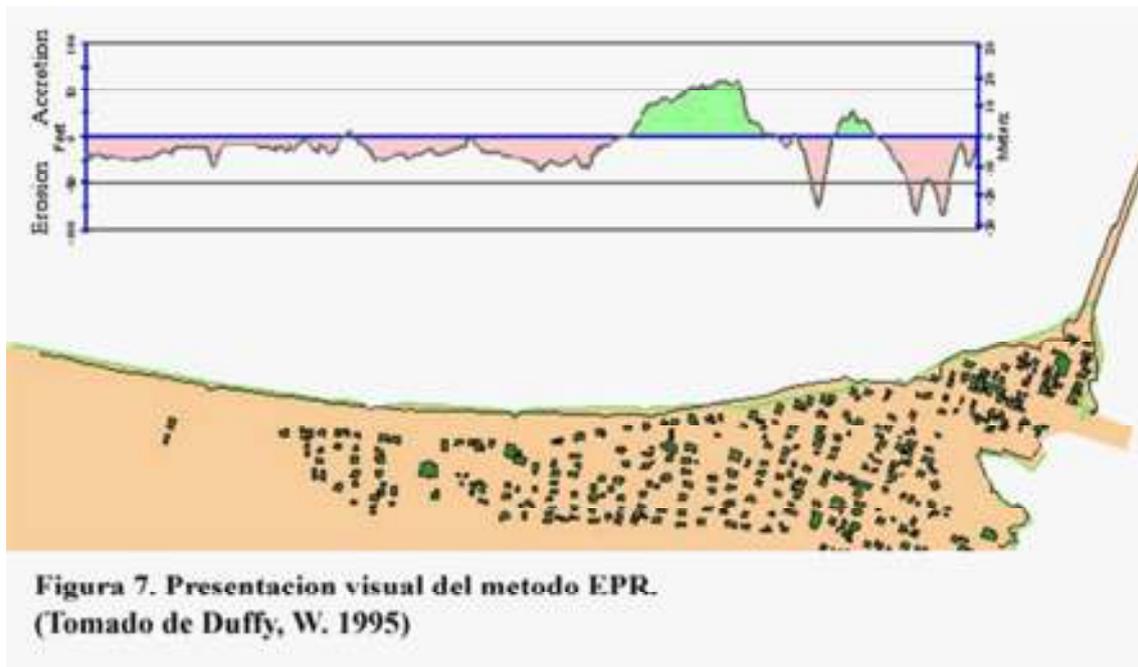
| Año de las fotos | Escala |
|------------------|----------|
| 1942 | 1/12 000 |
| 1952 | 1/40 000 |
| 1966 | 1/40 000 |
| 1969 | 1/17 000 |
| 1986 | 1/25 000 |
| 1997 | 1/18 000 |
| 2000 | 1/15 000 |

Tabla I. Series de fotos disponibles en el SAN para el valle de Moche

Otro problema con las fuentes cartográficas disponibles en el Perú es la incompatibilidad de datums verticales utilizados. La DHNM, como mencionado previamente, utiliza el nivel medio de bajamares de sicigias ordinarias, mientras que el IGN, el PETT y mayoría de mapas levantados con técnicas fotogramétricas, utilizan el nivel medio del mar.

La utilización de la línea de más alta marea como datum vertical estándar, podría ser una mejor solución para elaborar mapas de línea de costa. Esta es muy fácil de identificar en campo o en fotografías aéreas, permitiendo a técnicos no tan expertos delimitar un mismo datum, comparable con otros mapas.

Una vez que se cuenta con la línea de costa mapeada a través del tiempo en una base de datos digital, la determinación de las tasas de erosión anuales es un paso relativamente sencillo, gracias a la ayuda de programas de informática automatizados. Es recomendable utilizar los métodos EPR o el de regresión lineal. Ambos ofrecen pronósticos aceptables mediante simples procesos, siempre y cuando se cuente con series precisas y frecuentes, y la zona de estudio no haya sufrido de modificaciones humanas (muelles, puertos, extracción de arena, estabilización de dunas, etc.). Como vemos en la figura 7, el método EPR, puede ser gráficamente muy útil, mostrando diferencias muy sutiles a través de una línea de costa.



La utilización de estas tasas de erosión deben de tomar en cuenta ciertas consideraciones. En primer lugar, como mencionado anteriormente, deben de haber sido elaboradas con la mayor cantidad de datos precisos a través de periodos no menores a 30 años[26]. La naturaleza impredecible del patrón de las variaciones temporales de la línea de costa: diarias, estacionales, anuales, astronómicas, etc., deben de ser estudiadas en cada sector particular. Al mismo tiempo, el incremento en el nivel absoluto del mar y la ocurrencia de grandes tormentas, asociado al efecto invernadero y cambios climáticos naturales como el ENSO (Oscilación Sur / El Niño) o el PDO (Oscilación Decadal del Pacífico) , debe de ser incorporado en los pronósticos, ya que este fenómeno contribuye con una tendencia erosiva a largo plazo, casi imperceptible pero constante.

Un caso muy común cuando se utilizan las tasas de erosión anuales para la planificación, sin considerar estos factores, son los pronósticos sobreestimados, subestimados o los acertados pero con variaciones intermedias. En el primer caso, un pronóstico sobreestimado estaría desperdiciando valiosas tierras en la zona litoral, mientras que un pronóstico subestimado pondría en peligro las construcciones y ocasionaría pérdidas. En el caso de un pronóstico real, que no considere variaciones intermedias causadas por grandes eventos modificadores como tormentas o variaciones temporales cíclicas, también podría causar ciertas pérdidas.

En el hipotético caso de la figura 8, se ve en el recuadro a la línea de costa actual y la proyectada en 30 años. En el recuadro b, se muestra la verdadera línea de costa para el años 2032. El pronóstico podría considerarse muy acertado y las construcciones cercanas no habrían sufrido ningún daño. Sin embargo, en el recuadro c podemos ver un evento de tormenta en el 2015 que hace retroceder la línea de costa más de lo proyectado, aunque luego hay un ciclo de deposición que hace avanzar la línea de costa nuevamente cerca de su posición pronosticada en un principio. Algunas construcciones, guiadas por las regulaciones según la tasa de erosión, hubieran sido afectadas de todas maneras, como vemos en el recuadro d[27].

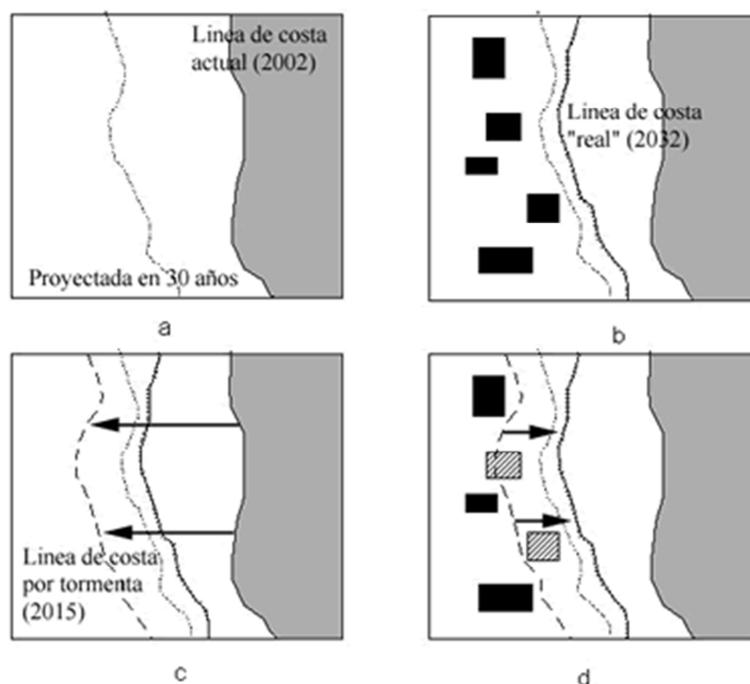


Figura 8. Tasa de erosión y su aplicación a la planificación (Tomado de Douglas, M. 1998)

Conclusiones

Los 3080 kilómetros de línea de costa peruana están densamente poblados y se pronostica que este crecimiento no se detendrá en el mediano plazo. Por consiguiente, las labores de planificación de los usos de suelos y el ordenamiento territorial de la zona litoral, son indispensables para el crecimiento sostenido de estas poblaciones, así como para la conservación de hábitats y ecosistemas costeros.

La complejidad y dinamismo de esta zona, delimitada por la línea de costa, hacen que un adecuado monitoreo de su evolución sea necesario para poder tener pronósticos más confiables que puedan ser incorporados en la planificación futura.

La variación de la línea de costa puede ser evaluada cuantitativamente mediante el uso de bases digitales incorporadas en un sistema de información geográfica (SIG). Para esto es necesario contar con fuentes cartográficas e imágenes obtenidas por teledetección a escalas adecuadas, con estándares de precisión preestablecidos y con la mayor frecuencia temporal posible. Se recomienda tener series de datos de no menos de 30 años para poder obtener tasas de erosión / deposición adecuadas.

Los mejores métodos para determinar las tasas de erosión de las líneas de costa, son el EPR y la regresión lineal. Estas tasas deben de tomar en cuenta ciertas consideraciones que pueden afectar la funcionalidad de los pronósticos, como la tendencia erosiva acelerada por el aumento del nivel absoluto de mar y los cambios cíclicos climáticos producidos por fenómenos como el ENSO o el PDO.

El monitoreo de la variación de la línea de costa debería ser llevado por organismos gubernamentales ad hoc y complementado por investigaciones permanentes de organismos no gubernamentales o educativos especializados en el tema. El mejor entendimiento de la evolución de la línea de costa puede contribuir con la prevención de pérdidas de obras civiles, propiedades privadas e incluso vidas humanas.

Bibliografía

BERGER, A.R. & IAMS, W.J (eds). 1996. Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems. Rotterdam: A.A. Balkema.

BIRD, Eric. 2000. Coastal Geomorphology. An Introduction. Wiley, West Sussex. 322pp.

BLOOM, A. Coastal Landforms. En: SHORT, N.M. y BLAIR, R. 1986. Geomorphology from Space. NASA. http://daac.gsfc.nasa.gov/DAAC_DOCS/geomorphology/GEO_HOME_PAGE.html

COQUE, Roger. 1984. Geomorfología. Alianza Editorial, Madrid. 475 pp.

CROWELL, M.; LEATHERMAN, S.P., y BUCKLEY, M.K., 1991. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 839-852.

CROWELL, M.; DOUGLAS, B.C., y LEATHERMAN, S.P., 1997. On forecasting future U.S. shoreline positions: a test of algorithms. *Journal of Coastal Research*, 13, 1245-1255.

DANIELS, Richard, HUXFORD, H., y MCCANDLESS, D.1998. Coastline Mapping and Identification of Erosion Hazard Areas in Pacific County, Washington. En: www.esri.campus.com

DOUGLAS, B.C.; CROWELL, M., y LEATHERMAN, S.P., 1998. Considerations for shoreline position prediction. *Journal of Coastal Research*, 14(3), 1025-1033.

DUFFY, W y DICKSON, S. 1995. Using grid and graph to quantify and display shoreline change. En: <http://apollo.ogis.state.me.us/projects/p074.htm>

EMERY, K. 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography*, v. 6,

90 – 93.

GALGANO, F.A., DOUGLAS, B.C., y LEATHERMAN, S.P., 1998. Trends and variability of shoreline position. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 26, 282-291.

HASLETT, Simon. 2000. Coastal Systems. Routledge, New York. 218 pp.

KOMAR, Paul. 1983. Handbook of coastal proceses and erosion. CRC, Florida. 305 pp.

NONN, Henri. 1987. Geografía de los litorales. Ediciones Akal, Madrid. 199 pp.

PAJAK, M.J., y LEATHERMAN, S.P., 2002. The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, 18(2), 329-337.

STRAHLER, A. 1997. Geografía Física. Ediciones Omega, Barcelona. 549 pp.

THIELER, R.E., y DANFORTH, W.W., 1994. Historical shoreline mapping (1): improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 549-563.

VAN DUSEN, Charles. 1997. Vector Based Shoreline Change Analysis. En: www.campus.esri.com

VEGAS, Manuel. Pesquería y acuicultura en el Perú. En: Manfer-Juan Mejía Baca. 1986. Gran geografía del Perú. Volumen VI. Ediciones Manfer, Barcelona.

[1] Coque, R. 1984

[2] Nonn, H. 1987

[3] Strahler, A. 1997

[4] Nonn. H. 1987

[5] Komar, P. 1983

[6] Bloom. A. 1986

[7] Strahler, A. 1997

[8] Vegas, M. 1986

[9] Haslett. S. 2000

[10] Komar, P. 1983

[11] Crowell, M. 1997

[12] Crowell, M. 1991

[13] Haslett, S. 2000

[14] Douglas, B. 1998

[15] Emery, K. 1961

[16] Crowell, M. 1991

[17] Pajak, M. 2002

[18] Thieler, R. 1994

[19] Crowell, M. 1991

[20] Ibid.

[21] Pajak, M. 2002

[22] Ibid

[23] Crowell, M. 1997

[24] Berger, A. 1996

[25] Haslett. S. 2000

[26] Douglas, B. 1998

[27] Ibid