

IMPACTO DE LA REPRESA DE GALLITO CIEGO EN LA ESTABILIDAD DE
LÍNEA DE COSTA EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO JEQUETEPEQUE, PERÚ

Carlos Tavares Corrêa

Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Humanidades
ctavare@pucp.pe

Gustavo Rondón Ramírez

Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Humanidades
grondon@pucp.edu.pe

RESUMEN

Los sedimentos fluviales cumplen un papel fundamental para el abastecimiento de las playas en la costa peruana cuya importancia no ha sido aun debidamente estimada. Con este fin, el estudio se centra en el papel que desempeña los sedimentos fluviales en la estabilidad de la línea de costa en la desembocadura del río Jequetepeque, ubicado en la costa norte del Perú. Este río, cuya cuenca abarca una superficie de 4,2 mil kilómetros cuadrados, aporta en promedio más de 900 millones de metros cúbicos al año (MMC año⁻¹) de agua y entre 2,9 y 8,0 MMC año⁻¹ de sedimentos al océano. A partir del inicio de las operaciones de la represa de Gallito Ciego en 1987, más de 104 MMC de sedimentos quedaron retenidos en el embalse. Con el fin de evaluar la influencia de la represa en el comportamiento de la desembocadura, se llevó a cabo la comparación entre las líneas de costa de los años 1962, 1980, 2003 y 2011 con el soporte de SIG. A partir del análisis se identificó el retroceso de la desembocadura entre 2003 y 2011 con tasas de -2.6 m año⁻¹. Por otra parte, el retroceso de la línea de costa observado en toda el área de estudio, entre 1962 y 2011, podría estar relacionado con la posible elevación del nivel del mar y la tendencia a la erosión de las playas a escala global.

Palabras clave: río Jequetepeque, sedimentos fluviales, retroceso de la línea de costa, SIG.

Impact of Gallito Ciego dam in the coastline stability at the Jequetepeque River mouth, Perú

ABSTRACT

River plays an essential function in providing sediments to the beach stability but this importance has not yet been properly estimated on the Peruvian coastline. So, the aim of this study focuses on the role of river sediments in the stability of the coastline at the Jequetepeque river

mouth, located at the northern coast of Peru. This river, whose basin covers an area of 4,200 square kilometers, provides in average more than 900 million cubic meters a year (MMC yr⁻¹) of water, and 2.9-8.0 MMC yr⁻¹ of sediments to the ocean. Since the start of the Gallito Ciego dam in 1987, more than 104 MMC of sediments were retained into the reservoir. In order to assess the impact of the dam on the stability of the river mouth, a comparison among different coastline moments (for the years 1962, 1980, 2003 and 2011) with the support of GIS, were made. The results showed that the river mouth retreat to the land between 2003 and 2011 with rates of -2.6 m year⁻¹. Moreover, the retreat of the coastline observed throughout the study area between 1962 and 2011, it could be related to the potential sea level rise and the trend of the worldwide beach erosion.

Key words: Jequetepeque River, fluvial sediments, coastline retreat, GIS.

INTRODUCCIÓN

Los ríos aportan el 95% de los sedimentos terrígenos presentes en los océanos (Syvitski et al., 2003; Walling, 2006). En términos globales, se estima que estos aportes varían entre 7000 y 10 000 millones de metros cúbicos al año¹ (Syvitski y Kettner, 2011; y Milliman y Farnsworth, 2011, respectivamente). La mayor parte de los sedimentos que llegan al océano son transportados en suspensión y solamente una pequeña parte se acumula en el ambiente costero. Milliman (2001), Syvitski y Kettner (2011) y Milliman y Farnsworth (2011) coinciden que la carga de fondo promedio corresponde al 10-20% de la carga total de sedimentos transportados por los ríos hacia el océano. Sin embargo, los ríos montañosos de regiones tectónicamente activas, cuyas cuencas no superan a los 10 000 km², pueden transportar mayor carga de fondo. Esto se debe a que la producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica aumenta con el relieve y con la disminución del tamaño de la cuenca, además de la influencia de factores de orden geológico y climático (Milliman y Syvitski, 1992; Inman y Jenkins, 1999; Milliman y Farnsworth, 2011; Warrick et al., 2013).

Por lo anterior, se entiende que los ríos son la principal fuente de sedimentos para el mantenimiento de las playas (Komar, 1976; Slattery y Phillips, 2010; Huang, 2011). Las playas asociadas a la desembocadura de los ríos son muy dinámicas en términos de variabilidad energética y morfológica, particularmente, en regiones donde los caudales fluviales tienen carácter episódico y estacional (Inman y Jenkins, 1999; Barnard y Warrick, 2010). En este ambiente tan dinámico, la configuración de la línea de costa responde a la interacción entre el régimen hidrológico y la producción de sedimentos

¹ Los valores, originariamente publicados en millones de toneladas al año (Mt año⁻¹), fueron convertidos a millones de metros cúbicos al año (MMC año⁻¹) según la relación: 1 m³ = 1.89 t.

de una cuenca, y la hidrodinámica de la franja litoral. Anthony (2015) sugiere que en un ambiente dominado por olas, la abundante carga de sedimento transportada por el río es bloqueada por las olas y corrientes litorales y dan lugar a la formación de barras en la desembocadura del río (*river-mouth bar*). Según Barnard y Warrick (2010), las mayores variaciones de la línea de costa se relacionan a la desembocadura de ríos que presentan caudales altamente variables.

Las represas construidas en los cauces de los ríos retienen entre 700 MMC año⁻¹ (Syvitski et al., 2005) y 2600 MMC año⁻¹ (Vörösmarty et al., 2003) que deja de ingresar al ambiente marino. Wang et al. (2011) y Gupta et al. (2012) mostraron que hay una proporcionalidad, a escala de décadas, entre la reducción del flujo de sedimentos de grandes ríos de Asia y el número de megarrepresas presentes en las respectivas cuencas. Con la disminución del aporte fluvial de sedimentos, las playas asociadas a la desembocadura de los ríos tienden a erosionarse y la línea de costa retrocede. Esta tendencia fue identificada en ejemplos, tales como en la desembocadura del río Duero en Portugal (Veloso-Gomes et al., 2006), en costa noroeste de California, EE.UU. (Barnard y Warrick, 2010), en río Tenryu en Japón (Huang, 2011), en río Volta en Gana (Boateng et al., 2012), en río Nestos, en Grecia (Andredaki et al., 2014), entre otros. Particularmente, Huang (2011) identificó que el proceso erosivo no es inmediato sino, que puede haber un lapso de tiempo entre la interrupción del suministro de sedimentos por la presa y la erosión de las playas. El objetivo del presente estudio es evaluar el impacto de la retención de los sedimentos fluviales por la represa de Gallito Ciego en la estabilidad de la línea de costa en la desembocadura el río Jequetepeque. Perú.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Jequetepeque, ubicada en la costa norte del Perú, entre los paralelos 07°6' y 07°30' de latitud sur y los meridianos 78°30' y 79°40' de longitud oeste (Figura 1), abarca una extensión aproximada de 4378 km². Según Teves (1982), las principales unidades geológico-geomorfológicas en el área de estudio son: el flanco occidental andino, constituido por afloramientos de naturaleza granodiorítica y tonalítica de colores rosados y grises, típicos del batolito costanero, y volcánicos andesíticos; el valle del río Jequetepeque, definido estructuralmente por un fallamiento en bloques; los macizos costeros, formados por rocas andesíticas e intrusiones de granodioritas; los cerros aislados constituidos de areniscas cuarzosas y cuarcitas con intercalaciones pequeñas de calizas y pizarras azuladas del Cretáceo Inferior; las pampas costeras, formadas por terrazas fluvioaluviales recubiertas localmente por depósitos eólicos; las playas de cantos rodados y arena; y los conos aluviales de tipo desértico, asociados a los macizos costeros, cerros aislados y estribaciones andinas.

El cauce principal del río Jequetepeque tiene una longitud de 161,5 km, una pendiente media de 2,6% y la dirección de su recorrido es de este a oeste, en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, cuyas aguas desembocan en el océano Pacífico. Los niveles altitudinales varían entre los 0 y 4188 metros sobre el nivel del mar (msnm), con precipitación media anual que incrementa con la altitud, entre 0 y 1100 mm (Peña y Vargas, 2006) en años normales y 220 a 3000 mm (Delgado, 1999) en años correspondientes al fenómeno de El Niño.

Según los datos de la estación Yonán, el río Jequetepeque produce una masa promedio anual de agua de 910 MMC año⁻¹ (Figura 2). El volumen máximo anual para el período analizado fue de 2,701 MMC año⁻¹, medido en el año hidrológico 1997-1998. Por otra parte, el volumen mínimo anual fue de 105 MMC año⁻¹, registrado en el año hidrológico de 1979-1980, y caracterizado como un año seco.

Debido al fuerte gradiente altitudinal y a las lluvias y caudales concentrados en los meses de verano, el río arrastra grandes cantidades de sedimentos durante el período estival. Según el Ministerio de Agricultura (1977), el río Jequetepeque transportó, entre 1969 y 1976, un total de 13 MMC de sedimentos con un promedio anual de 1,7 MMC año⁻¹. En otro estudio, ONERN (1988) determinó las tasas anuales de transporte para un período de 15 años (1970-1985). Salvo el período 1982-1984, que correspondió a un evento del fenómeno El Niño, el transporte anual de sedimentos fue alrededor de 1,3 MMC año⁻¹. Por otra parte, durante los años dominados por el fenómeno El Niño, el volumen de sedimentos transportado por el río Jequetepeque fue estimado en 31,3 MMC año⁻¹ (1982-1983) y 60,9 MMC año⁻¹ (1997-1998) (Delgado, 1999).

Con la construcción e inicio de las operaciones de la represa de Gallito Ciego en 1987, ubicada en la cuenca media-baja del río Jequetepeque (07°13' S y 79°10' W), los caudales del río fueron regulados en su tramo final hacia el océano. La represa forma un embalse con una superficie de 14 km², que se extiende por 12 km aguas arriba en la cota altimétrica de 404 metros sobre el nivel de mar (msnm) y se encuentra a 49 km de la desembocadura del río con el océano. El volumen total del embalse fue estimado en 545 MMC (INADE, 2005) y la mayor parte del caudal que libera se destina al abastecimiento de canales de riego para la actividad agrícola, ubicados en los márgenes derecho e izquierdo del río y una fracción mínima desagua en el océano. A partir de la construcción de la represa, se estima que más de 104 MMC de sedimentos han ingresado al embalse, lo que ha causado una reducción en 19% con respecto al volumen total inicial. En la tabla 1 se presentan los volúmenes calculados para el embalse a partir de levantamientos topográficos y batimétricos realizados por PEJEZA (Proyecto Especial Jequetepeque – Zaña), los volúmenes sedimentados y las tasas estimadas de sedimentación por períodos de tiempo.

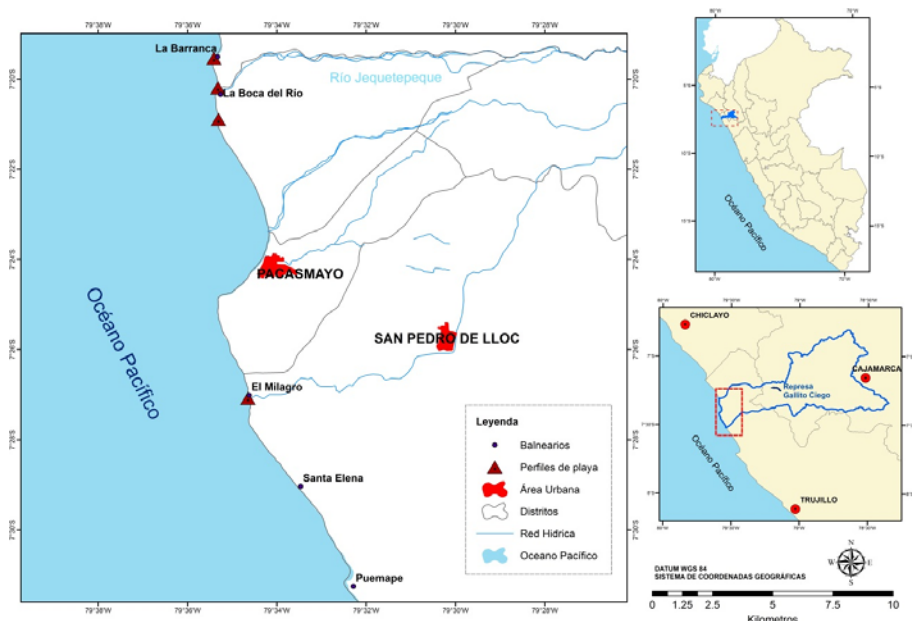


Figura 1. Localización de la cuenca del río Jequetepeque en el contexto nacional (derecha superior); ubicación de la represa de Gallito Ciego, de la estación hidrológica de Yonán (07°15' S y 79°06' W) y del área de estudio en la costa (derecha inferior); ubicación de los sectores de línea de costa analizados y de los perfiles de playa.

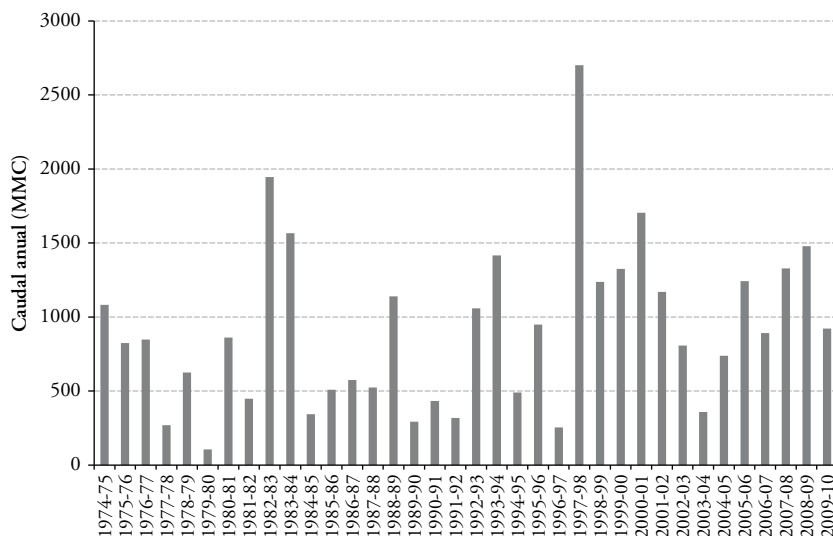


Figura 2. Caudal anual del río Jequetepeque entre 1974 y 2010, medidos en la estación Yonán (07°15' S y 79°06' W) y según el año hidrológico comprendido entre los meses de octubre y septiembre del año siguiente (Junta de Usuarios de Jequetepeque, 2011).

Tabla 1. Volúmenes y tasas de sedimentación estimados a partir de levantamientos topográficos y batimétricos en la represa de Gallito Ciego^{3,4}

Sedimentación a partir de 1987	1993³	1999³	2000³	2007⁴	2010⁴	2013⁴
Volumen total del embalse en la cota 404 m.s.n.m. (MMC)	527,5	479,7	479,2	462,2	452,0	440,4
Volumen total sedimentado desde 1987 (MMC)	17,2	65,0	65,5	82,5	92,7	104,3
Volumen total sedimentado (%)	3,2	11,9	12,0	15,1	17,0	19,1
Volumen sedimentado durante el intervalo de tiempo (en MMC)	17,2	47,8	0,5	17,0	10,2	11,6
Tasa media anual de sedimentación con respecto a 1987 (MMC/año)	3,4	5,9	5,5	4,3	5,4	4,2
Tasa media anual de sedimentación con respecto al año de referencia anterior (MMC/año)	3,4	8,0	0,5	2,4	3,4	3,0

En contacto con el océano, el río ha formado una llanura aluvial relativamente amplia cuyos márgenes se encuentran flanqueados por escarpes con 20 a 40 m de altura. Según Tevez (1982), estos escarpes fueron esculpidos por el río en los depósitos de la tercera terraza fluvioaluvial (t_{III}), formados por intercalaciones de materiales gruesos y finos, como cantos rodados y arenas. En contacto con el océano esta terraza forma acantilados casi verticales con alturas entre 20 y 25 metros al norte y al sur de la desembocadura del río Jequetepeque. La llanura aluvial presenta 3 a 4 niveles de terrazas ocupadas, principalmente, por la actividad agrícola y una llanura aluvial reciente con un ancho de 200 a 400 metros por donde se desenvuelve un cauce entrelazado compuesto de cantos rodados y arenas. Las playas asociadas a los acantilados son angostas y formadas por cordones de cantos rodados y arenas a lo largo del litoral excepto en la desembocadura. Allí se forma una barra de desembocadura (*river-mouth bar*) compuesta exclusivamente de cantos rodados que represa las aguas del río. Eventualmente, el río desagua al océano a través de un pequeño canal que mantiene abierto gracias a la mayor presión del caudal en la temporada de crecidas.

METODOLOGÍA

El análisis de la estabilidad de la línea de costa se concentró esencialmente entorno a la desembocadura del río Jequetepeque, en los sectores denominados Balneario La Barranca, Desembocadura y Boca del Río, que se extienden a lo largo de 4 km. Sin embargo, con fines de comparación, se aplicó el mismo análisis al sector costero ubicado

al sur y fuera de la influencia del río Jequetepeque, denominado El Milagro-Puémape, con 6,4 km de extensión. La metodología aplicada es la misma descrita por Leceta (2009), Grández (2010), Rondón (2011) y Tavares Corrêa y Drenkhan (2010). El análisis se basó fundamentalmente en la aplicación de la extensión *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), desarrollada por Thieler et al. (2009). El DSAS es una extensión diseñada para el *software* ArcGIS ArcInfo 10 de ESRI, y consiste en la determinación de la distancia más corta entre las líneas de costa a partir de una línea de referencia común y medida regularmente a cada 100 metros. Se utilizó el índice *Movimiento Neto de la Costa* (Net Shoreline Movement – NSM), que representa la variación total en metros de la línea de costa durante el período analizado. En el índice, los valores positivos representan períodos de avance de la línea de costa hacia el mar o de sedimentación y los negativos, representan períodos retroceso de la línea de costa hacia el continente o de erosión.

Las líneas de costa de los sectores mencionados fueron trazadas para los años 1962, 1980, 2003 y 2011 según los criterios previamente discutidos en León y Tavares Corrêa (2006). Estas corresponden a la distancia media entre la línea que representa la marca visible de la pleamar y de la línea de litoral de la foto o imagen (Tabla 2). Con este criterio, se pretendió reducir el error de interpretación que se puede incurrir al comparar dos líneas de costa de años distintos que se encuentran separadas de unos pocos metros. Dada las limitaciones para definir el nivel medio del mar en las fotos o imágenes se optó por trabajar con un error de variación estimado a partir de la pendiente de la playa y de la amplitud máxima de marea. Se determinó la pendiente a partir del levantamiento del perfil de playa según la técnica de Emery (1961), mientras que la máxima amplitud de marea se obtuvo a partir de los datos proporcionados por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN). Según este criterio, la distancia horizontal entre la pleamar y la bajamar (Figura 3) será mucho más grande en una playa suavemente inclinada que en otra fuertemente inclinada.

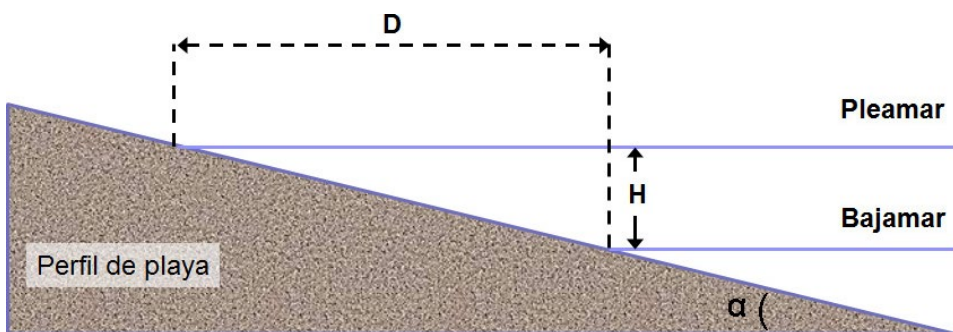


Figura 3. La variación horizontal entre la pleamar y la bajamar (D) depende de la pendiente de la playa (α) y de la amplitud máxima de marea (H).

Al comparar dos líneas de costa de años diferentes, la distancia que separa a ambas solo corresponde a un retroceso o avance neto de la línea de costa durante el período analizado si la distancia entre ellas es superior a la distancia horizontal (D) de la amplitud máxima de marea. De lo contrario, la variación medida se debería al ciclo de marea o al flujo y reflujo de las olas y no a un avance o retroceso neto de la línea de costa.

Tabla 2. Fuentes cartográficas utilizadas para el trazado de la línea de costa en el litoral adjunto al río Jequetepeque

Fuentes	Autor	Escala	Año	Escenas
Carta Nacional	IGN	1/25000	1962	2
Fotografías aéreas	SAN	1/20000	1980	7
Google Earth	Digital Globe	-	2003	1
Google Earth	Digital Globe	-	2011	1

RESULTADOS

Perfiles de playa

En la figura 4 se presentan los perfiles de playa levantados en los sectores costeros correspondientes al entorno de la desembocadura del río Jequetepeque, en los sectores denominados La Barranca (al norte), Desembocadura y Boca del Río (al sur); y el sector El Milagro, ubicado a 15 km al sur y fuera del área de influencia de la desembocadura del río Jequetepeque. En la tabla 3 se presenta los errores estimados de variación de la línea de costa a partir de los perfiles levantados en cada localidad. La pendiente del perfil de La Barranca es el más pronunciado ($9,9^\circ$), mientras que en los demás perfiles las pendientes varían entre $4,2^\circ$ y 5° . En concordancia con las pendientes encontradas y, combinadas con la amplitud máxima de marea para este sector costero, se pudo establecer que el margen de error para La Barranca es inferior ($\pm 5,26\text{m}$) al estimado para las demás localidades (promedio de $\pm 11,3\text{m}$).

Tabla 3. Error estimado para la variación de la línea de costa según la amplitud horizontal de la marea para cada sector en función de la pendiente de playa

Perfil	Pendiente (grados)	Amplitud máxima de marea (m)	Variación horizontal de la marea (m)	Margen de error estimado (m)
La Barranca	9,9	1,84	10,5	5,26
Desembocadura	4,2	1,84	25,0	12,52
Boca del Río	5,0	1,84	21,2	10,59
El Milagro	4,9	1,84	21,6	10,78

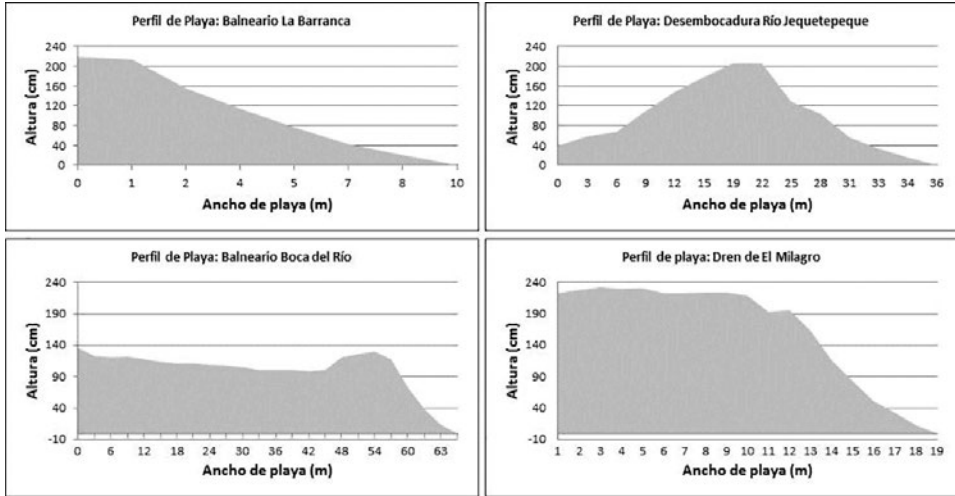


Figura 4. Perfiles de playa levantados en las estaciones La Barranca, Desembocadura del río Jequetepeque, Boca del Río y El Milagro.

Variación de la línea de costa

Las figuras 5, 6, 7 y 8 muestran la variación espacio-temporal de la línea de costa en los sectores La Barranca, Desembocadura, Boca del Río y El Milagro, respectivamente. Para todos los casos, se compararon las líneas de costa de los años 1962, 1980, 2003 y 2011.

En la figura 5 se observa la variación de la línea de costa en el sector del balneario La Barranca, ubicado al norte de la desembocadura del río Jequetepeque. El comportamiento entre las líneas de costa sugiere que la de 1980 representa el mayor retroceso hacia el continente registrado para este sector, excepto en el extremo sur de la imagen, donde el mayor retroceso se dio con la línea de costa de 2011. Por otra parte, el mayor avance de la línea de costa se da en 2003 en la parte sur del sector. Hacia el norte, la línea de costa más avanzada hacia el mar es la de 1962 y, por lo tanto, este sector costero está retrocediendo desde entonces.

En la figura 6 se puede observar que en la misma desembocadura las líneas de costa de 1980 y 2011 son las que señalan el mayor retroceso con relación a los otros años, cuando las líneas de costa se encontraban más avanzadas hacia el mar (2003 y 1962, en esta orden). Sin embargo, en la parte sur del sector la posición de la línea de costa del 2003 coincide, aproximadamente, con las de 1980 y 2011. La línea de costa de 1962 fue la posición más avanzada y ha experimentado, aparentemente, un fuerte retroceso hacia las posiciones ocupadas por las líneas de 1980, 2003 y 2011. Esta tendencia se mantiene hacia el sur, representada en la figura 7, y solo se alteran en el tercio final cuando la línea de costa de 2003 presenta un avance hacia la posición de 1962.



Figura 5. Variación de la línea de costa para el sector La Barranca, ubicado al norte de la desembocadura del río Jequetepeque, para los años 1962, 1980, 2003 y 2011.

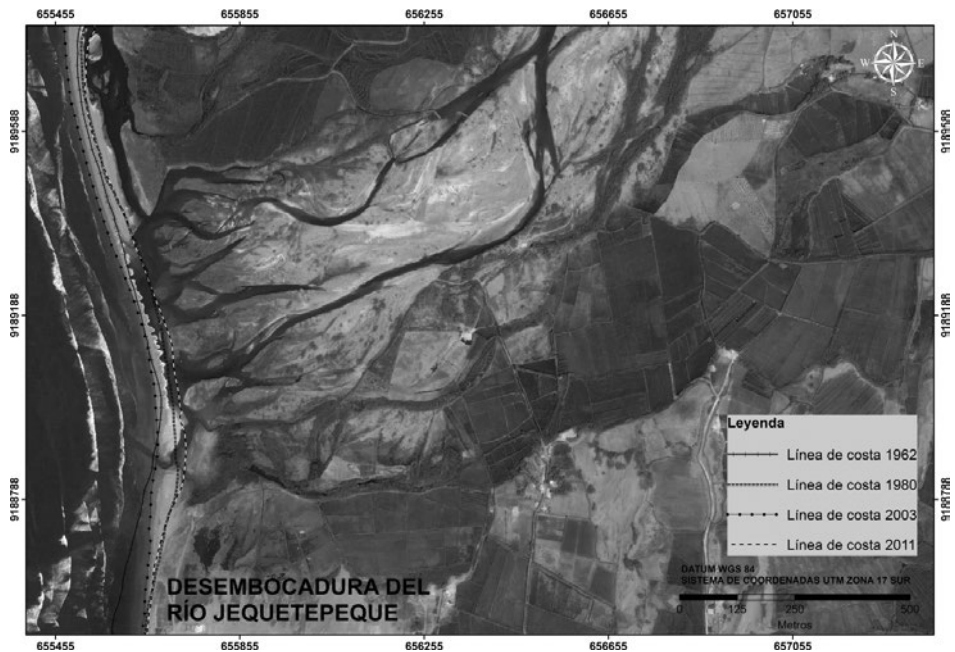


Figura 6. Variación de la línea de costa para el sector comprendido por la desembocadura del río Jequetepeque, para los años 1962, 1980, 2003 y 2011.

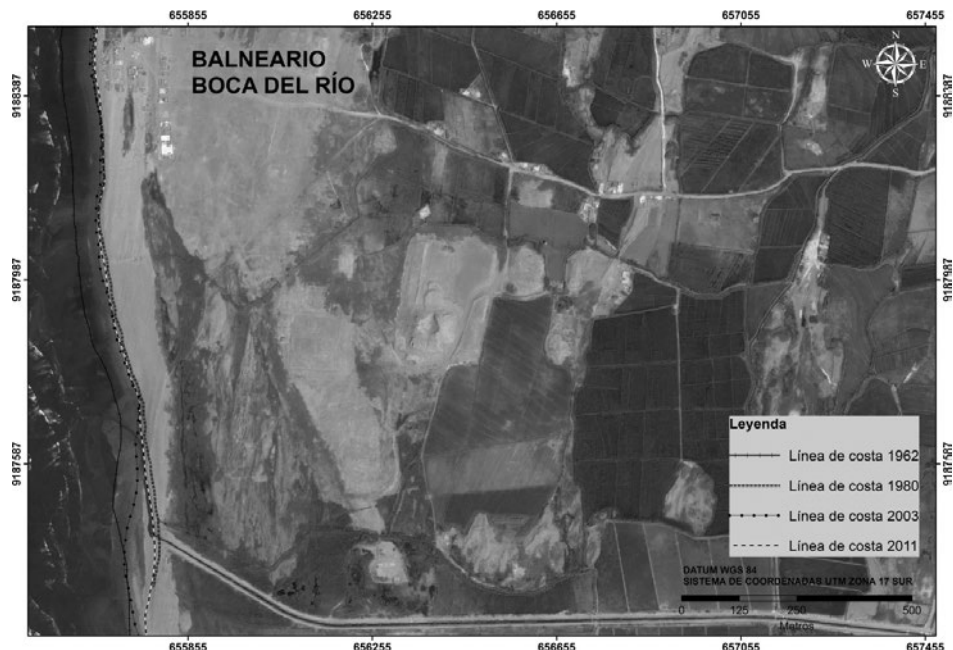


Figura 7. Variación de la línea de costa para el sector Boca del Río, ubicado inmediatamente al sur de la desembocadura del río Jequetepeque, para los años 1962, 1980, 2003 y 2011.

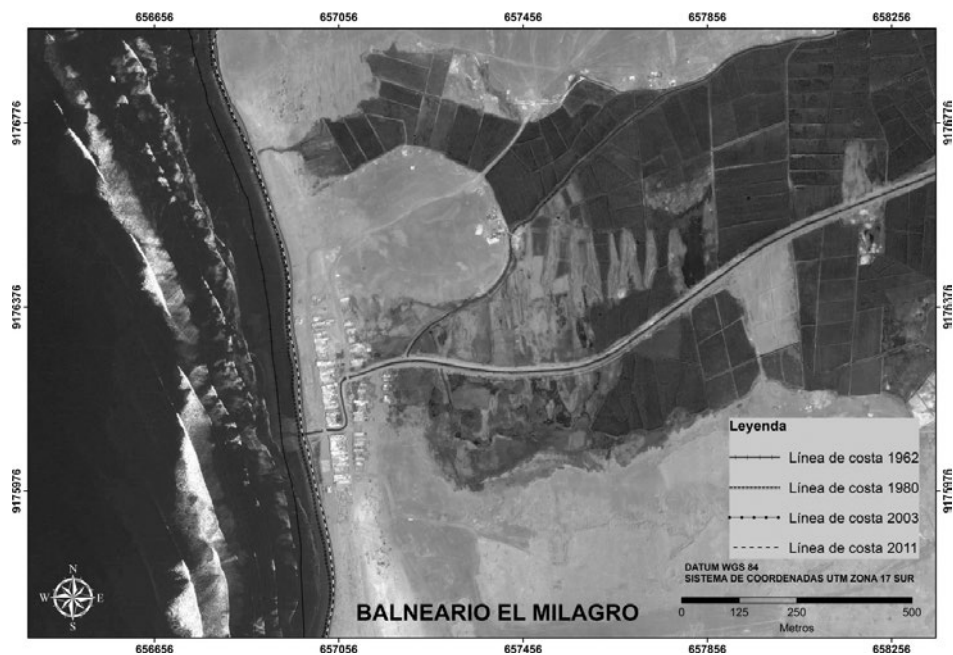


Figura 8. Variación de la línea de costa para el sector El Milagro, ubicado al sur de la desembocadura del río Jequetepeque, para los años 1962, 1980, 2003 y 2011.

Finalmente, en la figura 8 se representa el balneario El Milagro, ubicado en el distrito de San Pedro de Lloc. Aunque se encuentre al sur y esté alejado de la influencia de la desembocadura, la línea de costa de este sector costero presenta un comportamiento similar a los sectores anteriormente descritos, donde la línea de costa más avanzada hacia el mar es la de 1962 y las demás ocupan posiciones más replegadas hacia el continente. A pesar de agrupadas, en este sector se nota un continuo retroceso de la línea de costa a partir de la de 1980 cuyo máximo se alcanzó en 2003 y un pequeño avance hacia el 2011. A pesar de que existe un canal de drenaje que desemboca en el mar, este al parecer no aporta los sedimentos necesarios para que esta tendencia erosiva se altere.

El movimiento neto de la línea de costa

Las fotografías aéreas de 1980 son la información previa y más cercana a la fecha de la construcción de la represa de Gallito Ciego, concluida en 1987. Así, se tomó la línea de costa de 1980 como el año umbral para identificar la influencia de la represa en la variación de la línea de costa.

Las figuras 9 y 10 corresponden al sector de la desembocadura, mientras que las figuras 11 y 12, al de El Milagro. En estas figuras se estiman la distancia horizontal entre las líneas de costa, medidas en transectos a cada 100 metros, en los dos sectores mencionados, respectivamente, para los intervalos de tiempo de 1962-1980 y 1980-2011. En la figura 9, la línea de costa del sector de la desembocadura presenta valores entre -8 y -88 metros de variación, lo que indica un retroceso de la costa hacia el continente durante el período 1962-1980. Pese a que el balance es negativo, la menor variación en la desembocadura (entre -8 y -36 m) puede deberse a que los sedimentos aportados por el río durante el período de mayor caudal han minimizado el retroceso. Para el período 1980-2011, la línea de costa presenta un comportamiento distinto, con avances al norte (entre 3 y 42 m), retroceso en la desembocadura (entre -5 y -23 m) y relativa estabilidad en la parte sur (entre 2 y 12 m) dado que el margen de error es de 10,59 m en este sector. Mientras tanto, en el sector el Milagro-Puémape, cuya línea de costa no es afectada por el río Jequetepeque, los resultados para los mismos intervalos de tiempo son expresados en las figuras 11 y 12. En ambas figuras, se puede observar que la línea de costa tiene un comportamiento bimodal en los dos períodos. En el período 1962-1980, la porción norte de este sector retrocede (entre -4 y -61 m), de manera similar al comportamiento de la desembocadura. Sin embargo, en la porción sur predomina el avance de la línea de costa (entre 2 y 45 m). Para el período 1980-2011, la porción más al norte se presenta relativamente estable con un ligero retroceso (entre 0 y -22 m; margen de error de 10,78 m) y la porción central y sur han sufrido un fuerte retroceso que varía entre -30 y -141 metros.

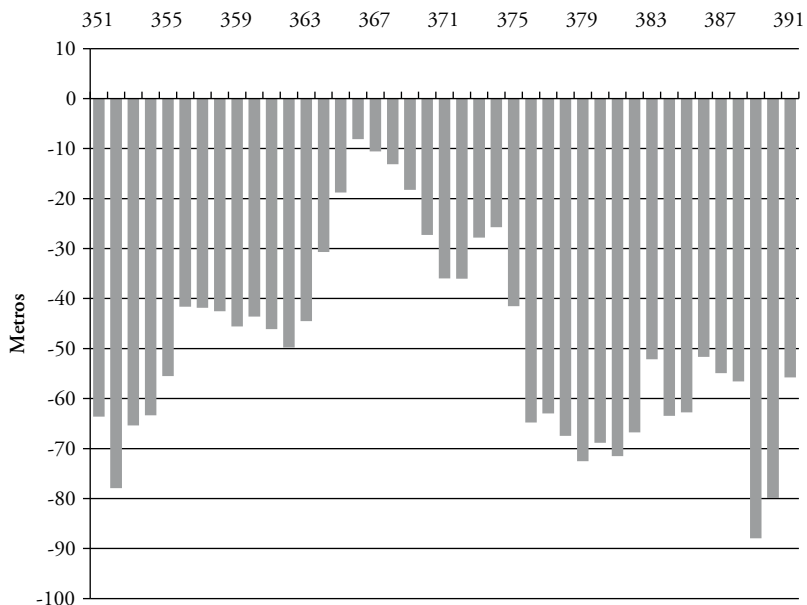


Figura 9. Estimación del movimiento neto de la costa en el sector La Barranca - desembocadura del río Jequetepeque para el período comprendido entre 1962 y 1980.

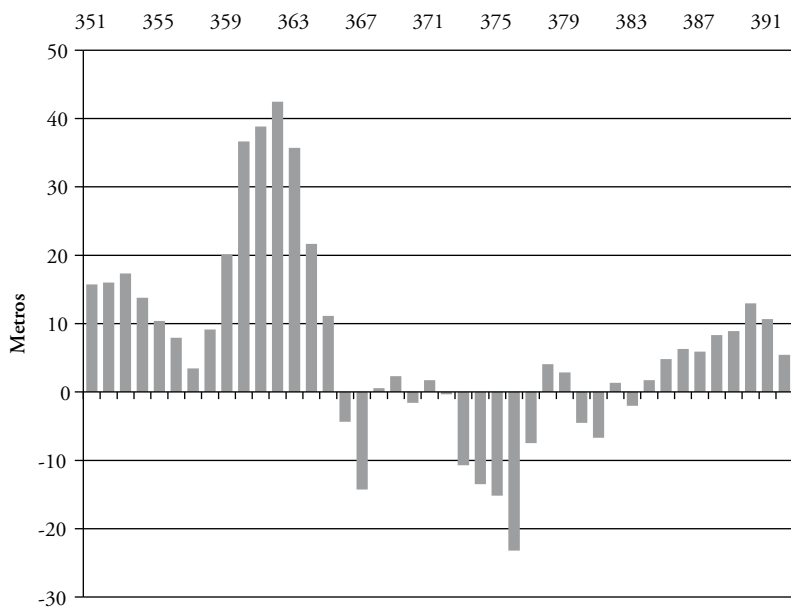


Figura 10. Estimación del movimiento neto de la costa en el sector La Barranca - desembocadura del río Jequetepeque para el período comprendido entre 1980 y 2011.

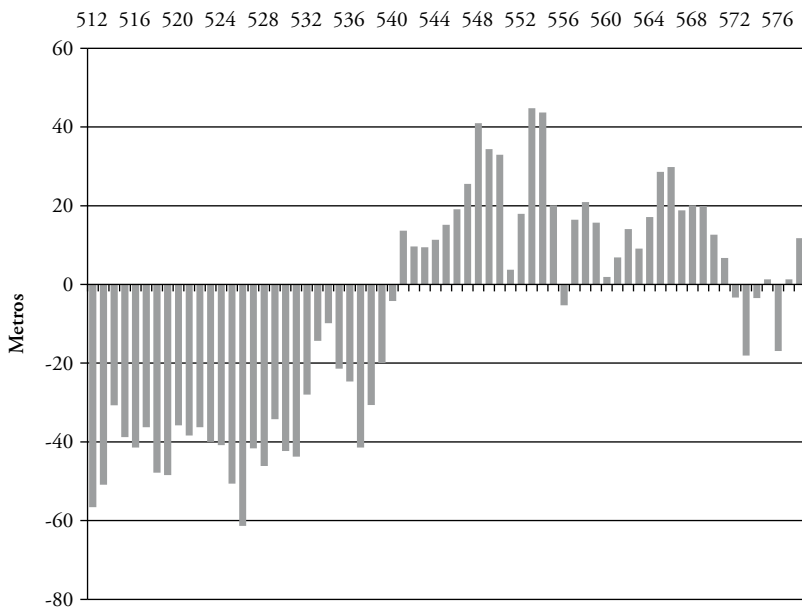


Figura 11. Estimación del movimiento neto de la costa en el sector El Milagro - Puémapo para el período comprendido entre 1962 y 1980.

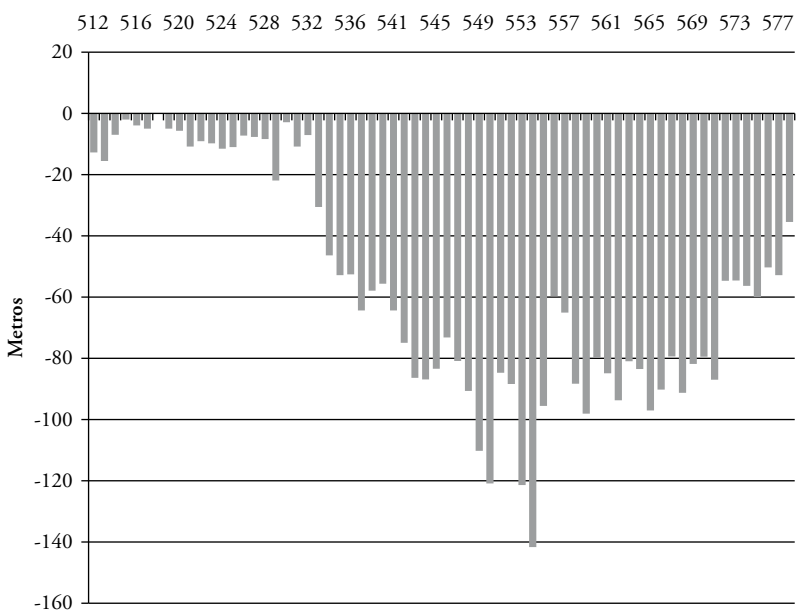


Figura 12. Estimación del movimiento neto de la costa en el sector El Milagro - Puémapo para el período comprendido entre 1980 y 2011.

DISCUSIÓN

Es innegable la importancia de los ríos como fuente de sedimentos para el mantenimiento de las playas y la estabilidad de la línea de costa (Komar, 1976, Syvitski et al., 2003; Syvitski et al., 2005; Walling, 2006). En la costa peruana, los sedimentos fluviales cumplen un papel fundamental para el abastecimiento de la costa y cuya importancia no ha sido aun debidamente estimada. Según Milliman y Farnsworth (2011), los ríos de la costa norte de California (EE.UU.) son representativos de cuencas hidrográficas típicas de los márgenes tectónicamente activos, como es el caso de la costa peruana. Entre las principales características, estos ríos no poseen un recorrido extenso, las cuencas son relativamente pequeñas (<10 000 km²), su relieve es pronunciado, y sin embargo, producen grandes cantidades de sedimentos (Milliman y Syvitski, 1992; Milliman y Farnsworth, 2011; Warrick et al., 2013). Con respecto al régimen hidrológico, el 90% del caudal fluvial en los ríos californianos se concentra entre noviembre y mayo y aportan entre el 60% y el 95% de los sedimentos acumulados en las playas (Hicks e Inman, 1987). En la costa peruana, el régimen hidrológico es similar al de la costa californiana. Particularmente, la cuenca del río Jequetepeque, concentra el 87% del caudal en los meses de diciembre y mayo (Figura 13). Si bien la información hidrológica es satisfactoria para la mayoría de los ríos de la costa peruana, lo mismo no se puede decir con respecto al aporte de sedimentos fluviales al océano.

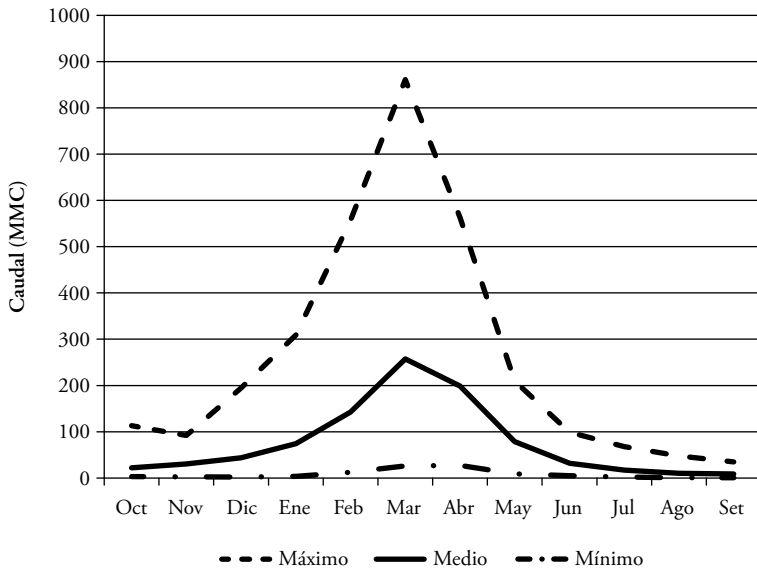


Figura 13. Valores promedio de los caudales máximos, medios y mínimos del río Jequetepeque, según la estación hidrológica de Yonán para el período entre 1975 y 2010.

En las tres últimas décadas, el único dato de carga sólida en suspensión citado en la literatura fue el estimado por Burz (1977) para el río Chira (por ej.: Milliman y Meadle, 1983; Milliman y Syvitski, 1992; Milliman y Farnsworth, 2011; Latrubesse y Restrepo, 2014). En este sentido, el aporte de los ríos de la costa peruana hacia el océano es muy poco conocido y requiere de más información para comprender su real importancia. Con la construcción de la represa de Gallito Ciego en la cuenca media/baja del río Jequetepeque, una serie de datos fueron generados sobre el transporte de sedimentos. Para años hidrológicos considerados normales, el río transporta anualmente entre 1,3 MMC (Ministerio de Agricultura, 1977) y 1,7 MMC (ONERN, 1988) de sedimentos. A partir de estudios batimétricos (véalo en la Tabla 1) para monitorear la variación volumétrica del reservorio, se pudo determinar que el total de sedimentos acumulados en la represa entre 1987 y 2013 fue de 104,3 MMC. Anualmente, se ha acumulado alrededor de 4,2 MMC año⁻¹ de sedimentos en la represa. Sin embargo, esta tasa es dos a tres veces mayor que las tasas inicialmente estimadas antes de la construcción de la obra debido a la ocurrencia del fenómeno de El Niño 1997-1998.

Durante los años hidrológicos influenciados por el fenómeno de El Niño, los caudales extremos pueden transportar grandes cantidades de sedimentos al océano. Durante el año hidrológico El Niño de 1982/1983, que ocurrió antes de la construcción de la represa, el río Jequetepeque transportó directamente al océano alrededor de 31,3 MMC de sedimentos (ONERN, 1988). Relacionado a este evento, Woodman y Mabres (1993) documentaron la formación de un nuevo cordón arenoso en la playa de Máncora construido a partir de los sedimentos transportados hacia la playa por los caudales de tres quebradas reactivadas durante El Niño de 1982/1983. Posteriormente, durante el año hidrológico de El Niño de 1997-1998, los 60,9 MMC de los sedimentos transportados por el río Jequetepeque se acumularon en la represa. Desde la instalación de la represa (1987), más de 104,3 MMC de sedimentos dejaron de ingresar al océano. Del total de sedimentos transportados por el río Jequetepeque, se estima que el 30% corresponde a la carga de fondo que se depositaría en la playa y franja litoral. Los 70% restantes corresponden a los sedimentos finos en suspensión (Inrena, 2004; Inade, 2005) transportados a mayores profundidades. Dado que la carga de fondo de un río es aproximadamente el 10-20% de la carga sólida total (Milliman, 2001; Milliman y Farnsworth, 2011), la carga de fondo transportada anualmente por el río Jequetepeque es superior a este valor promedio. Este comportamiento coincide con los descritos por Milliman y Syvitzki (1992), Milliman (2001), Barnard y Warrick (2010), Milliman y Farnsworth (2011) y Syvitski y Kettner (2011), entre otros, que reconocen el aporte significativo de sedimentos provenientes de ríos ubicados en márgenes tectónicamente activos. Por lo tanto, la interrupción del aporte anual de sedimentos por la represa debería producir alteraciones significativas en la línea de costa adyacente a la desembocadura del río Jequetepeque.

El análisis comparativo entre fotografías aéreas e imágenes satelitales constituye una herramienta valiosa para determinar las variaciones de la línea de costa en años o décadas. Para el área de estudio, y pese a que la represa fue construida en 1987, las únicas fotografías aéreas disponibles como umbral de referencia para el antes y después de la construcción de Gallito Ciego fueron las de 1980. La ventaja de utilizar estas fotos es que la línea de costa no ha sufrido ningún efecto de la represa. Pero, entre 1980 y 1987 ha ocurrido un fenómeno El Niño de gran magnitud que pudo haber modificado significativamente la línea de costa, tal como lo documentaron Woodman y Mabres (1993). En este sentido, Macharé y Ortlieb (1993) propusieron que las secuencias de cordones litorales, de edad holocénica, presentes en algunos sectores de la costa peruana se deben a eventos El Niño muy fuertes. Sin embargo, e independientemente de la escala temporal de análisis, estos cambios solo durarían en el paisaje caso los aportes de sedimentos fuesen continuos o se produjera una reducción relativa del nivel del mar. En un evento excepcional ocurrido en enero del 2005, el río Santa Clara, California, aportó alrededor de 5,1 MMC de sedimentos que causó un avance de 170 m en la línea de costa del litoral de Santa Bárbara; al cabo de tres años, y con la disminución del aporte de sedimentos, la línea de costa regresó a su posición anterior con tasas de erosión o de retroceso del orden de -45 m año^{-1} (Barnard y Warrick, 2010). En otras palabras, pese a la gran acumulación de sedimentos en la costa aportados por el río Jequetepeque durante El Niño de 1982-1983, es probable que al cabo de algunos años la línea de costa haya retrocedido hacia una posición próxima a la anterior. Esto se debió a que la reducción o interrupción del aporte de sedimentos al sistema litoral llevó a un desequilibrio en el balance de sedimentos que resultó en la erosión de la playa y el retroceso de la línea de costa post El Niño.

Con la definición de 1980 como año de referencia para determinar el impacto de la represa de Gallito Ciego en la línea de costa, se analizaron los períodos previo (1962-1980) y posterior (1980-2011) a este año base. Durante el período 1962-1980, se esperaba una estabilidad o hasta un avance de la línea de costa mantenido por el aporte continuo de sedimentos del río. Sin embargo, todo el sector de la desembocadura del río Jequetepeque ha retrocedido hacia el continente entre -8 y -88 metros con tasas de hasta -5 m año^{-1} . Por otra parte, se esperaba un retroceso de la línea de costa entre 1980 y 2011 debido a una posible escasez de sedimentos y como resultado, se observó el avance de hasta 42 m en la parte norte y el retroceso o estabilidad en la parte sur de la desembocadura. Pese a que los datos anteriores no corroboran la hipótesis inicial, al analizar el período 2003-2011 (figura 14), se pudo determinar el retroceso de la línea de costa de hasta -67 m y con tasas de $-2,6 \text{ m año}^{-1}$ en promedio tal como se esperaba y quizá sea una tendencia que predomine en los próximos años. Este posible retraso de la tendencia erosiva en la desembocadura del río Jequetepeque podría deberse a factores no necesariamente coinciden con los observados por Huang (2011) en la costa de Japón.

Posiblemente, el cauce del río en su tramo final podría ser la principal fuente de sedimentos para la estabilidad de la línea de costa hasta muy recientemente.

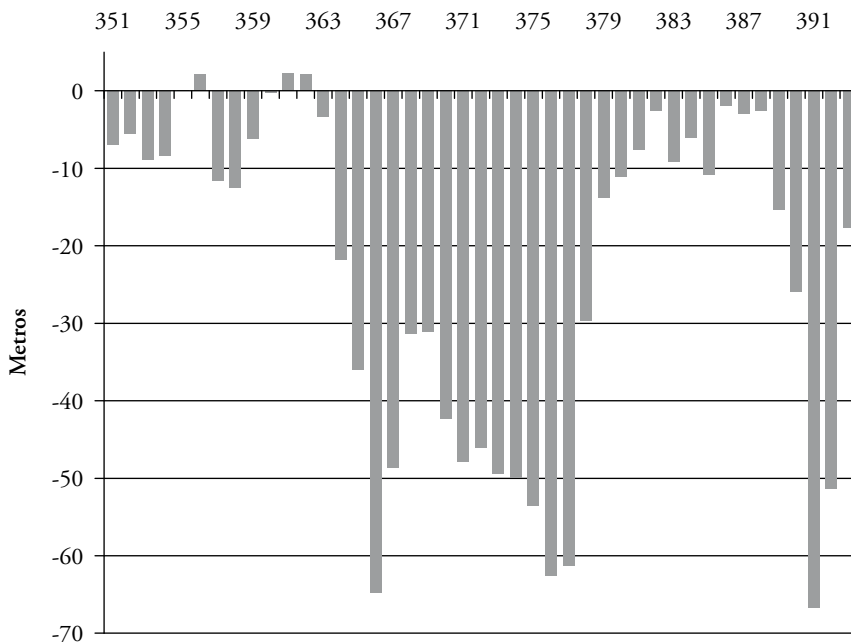


Figura 14. Estimación del movimiento neto de la costa en el sector La Barranca - desembocadura del río Jequetepeque para el período comprendido entre 2003 y 2011.

Las tasas de retroceso determinadas para la desembocadura del río Jequetepeque (entre -2 y -5 m año⁻¹) no son comparables con las de grandes ríos cuya carga de sedimentos es alterada por represas, como en el delta del río Nilo, cuyas tasas de retroceso llegan a -106 m año⁻¹ (Frihy et al., 2008). Sin embargo, pueden ser comparadas con las de ríos que aportan cargas similares de sedimentos a un ambiente costero de alta energía dominado por olas. Este parece ser el caso del río Santa Clara de California, que aporta en promedio alrededor de $0,6$ MMC año⁻¹ de sedimentos al litoral y pueden producir variaciones de la línea de costa con tasas inferiores a 1 m año⁻¹ (Barnard y Warrick, 2010). Por otra parte, la reducción del aporte de sedimentos del río Duero en la costa noroeste de Portugal, provoca retrocesos que oscilan entre $0,3$ y $7,1$ m año⁻¹ (Veloso-Gomes et al., 2006) Finalmente, la construcción de una represa en el río Nestos, en la costa griega del mar Jónico, ha reducido en 83% el aporte de sedimentos y provocado la erosión de la línea de costa (Andredaki et al., 2014).

A partir de la comparación entre las líneas de costa de la desembocadura y la de El Milagro, y dado que ambos sectores están bajo condiciones similares de energía del oleaje, se observa lo siguiente: El Milagro no dispone de una fuente similar de sedimentos como en la desembocadura, excepto con la reactivación de quebradas secas durante un evento El Niño. Pese a esta diferencia, la parte norte de este sector presentó un comportamiento similar al de la desembocadura entre 1962-1980, con retrocesos de hasta -62 m. Pero, la parte sur de El Milagro experimentó avances de la línea de costa de hasta 45 m. En el período 1980-2011, la parte norte de El Milagro se estabilizó (tasas inferiores a 1 m año^{-1}) y hacia el sur la línea de costa de este sector experimentó un gran retroceso, de hasta -142 m, con tasas de hasta -5 m año^{-1} . Sin embargo, el comportamiento más notable fue el retroceso casi total de la línea costa comprendida entre la desembocadura y El Milagro en el período 1962 y 2011 (figura 15). El retroceso fue de -51 m en promedio, con variaciones de hasta -98 m y tasas de erosión que no superan a -2 m año^{-1} . Este retroceso de la línea de costa también puede relacionarse con la posible elevación del nivel del mar y la tendencia a la erosión de playas a escala global (ej. Bird, 1985; Zhang et al., 2004; Nicholls et al., 2007; Church y White, 2011; Hinkel et al., 2013).

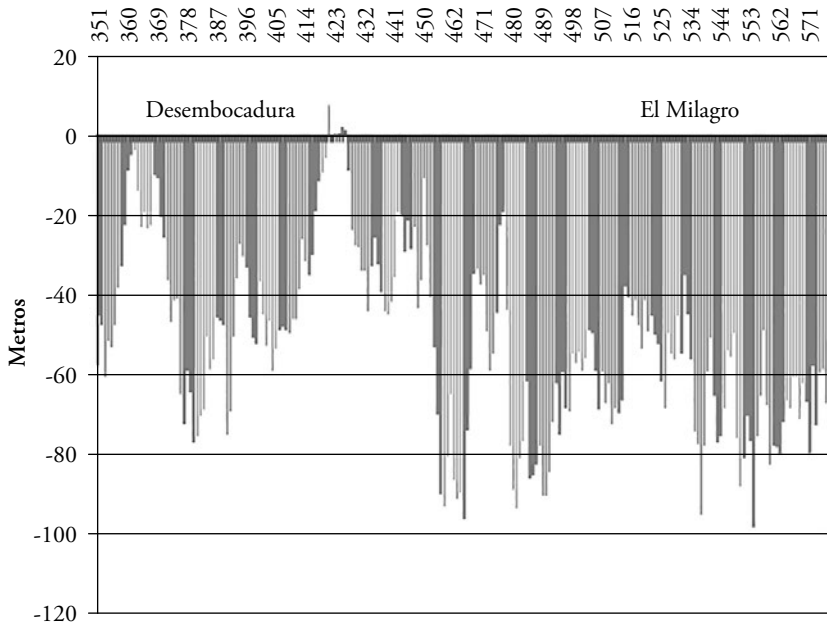


Figura 15. Estimación del movimiento neto de la línea de costa entre la desembocadura del río Jequetepeque y El Milagro para el período comprendido entre 1962 y 2011.

CONSIDERACIONES FINALES

A partir de la discusión se considera que los ríos de la costa peruana cumplen un papel esencial para el abastecimiento de sedimentos hacia las playas, pero se requieren de más estudios para evaluar su real importancia. Particularmente, se ha estudiado la cuenca del río Jequetepeque por ser comparable a cuencas de otras regiones del planeta cuyas dimensiones, características físicas, régimen hídrico y aporte de sedimentos son similares e influyen sobre la estabilidad de la línea de costa. Se considera como probable que la tendencia erosiva observada en la desembocadura del río Jequetepeque, entre 2003 y 2011, se deba a la presencia de la represa de Gallito Ciego, que retiene los sedimentos del río desde 1987. Por otra parte, no se descarta la influencia de otros factores, como el aumento del nivel del mar por el cambio climático, debido a la tendencia erosiva que presenta toda el área de estudio durante el período entre 1962 y 2011.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Dirección de Gestión de la Investigación de la PUCP, a través de la subvención DGI 70245-0110. Además, los autores agradecen al bachiller Gabriel Koo, por su apoyo durante los trabajos de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Andredaki, M., Georgoulas, A., Hrissanthou, V. y Kotsovinos, N. (2014). Assessment of reservoir sedimentation effect on coastal erosion in the case of Nestos River, Greece. *International Journal of Sediment Research*, 29, 34-48.
- Anthony, E. J. (2015). Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: a review. *Marine Geology*, 361(1) March, 53-78.
doi:10.1016/j.margeo.2014.12.004
- Barnard, P.L. y Warrick, J.A., (2010). Dramatic beach and nearshore morphological changes due to extreme flooding at a wave-dominant river mouth. *Marine Geology*, 271, 131-148.
- Bird, E. C. F. (1985). *Coastline Changes*. Nueva York: Wiley & Sons.
- Boateng, I., Bray, M. y Hooke, J. (2012). Estimating the fluvial sediment input to the coastal sediment budget: A case study of Ghana. *Geomorphology*, 138, 100-110.
- Burz, J. (1977). Suspended load discharge in the semiarid region of the northern Peru. *IAHS Publ.*, 122, 269-277.
- Church J.A. y White, N.J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, 32, 585-602.

- Delgado L.R. (1999). Estudio inicial de aporte de sedimentos del río Jequetepeque al embalse Gallito Ciego. Condesan, CAJ 13/99.
- Emery, K.O. (1961). A simple method of measuring beach profiles: *Limnology and Oceanography*, 6, 90-93.
- Frihy, O., Hassan, M., Deabes, E. y Badr, A. (2008). Seasonal wave changes and the morphodynamic response of the beach-inner shelf of Abu Qir Bay, Mediterranean coast, Egypt. *Marine Geology*, 247, 145-158.
- Grández, M. I. (2010). Evolución de línea de costa en las playas: La Chira, La Encantada de Villa, Mamacona y Conchán. Distritos de Chorrillos, Villa El Salvador y Lurín. Tesis de Licenciatura en Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Letras y Ciencias Humanas, Pontificia Universidad Católica del Perú (Inédita).
- Gupta, H., Kao, S-J. y Dai, M. (2012). The role of mega dams in reducing sediment fluxes: A case study of large Asian rivers. *Journal of Hydrology*, 464-465, 447-458. doi: 10.1016/j.hydrol.2012.07.038
- Hicks, D.M. e Inman, D.L. (1987). Sand dispersion from an ephemeral river delta on the Central California coast. *Marine Geology*, 77, 305-318.
- Hinkel, J., Nicholls, R. J., Tol, R. S., Wang, Z. B., Hamilton, J. M., Boot, G., Vafeidis, A. T., McFadden, L., Ganopolski, A. y Klein, R.J. (2013). A Global Analysis of Coastal Erosion of Beaches due to Sea-level Rise: An Application of DIVA. *Global and Planetary Change*, 111, 150-158. doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.09.002
- Huang, G. (2011). Time lag between reduction of sediment supply and coastal erosion. *International Journal of Sediment Research*, 26, 27-35.
- Inade (2005). Gestión de oferta de agua en cuencas de Proyectos Hidráulicos del Inade – Perú.
- Inman, D. L. y Jenkins, S. A. (1999). Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *Journal of Geology*, 107, 251-270.
- Inrena (2004). Actualización del Plan de Ordenamiento Ambiental de la cuenca del río Jequetepeque para la protección del reservorio Gallito Ciego y su valle agrícola. Perú. Volumen 3, p. 95.
- Junta de Usuarios de Jequetepeque (2011). Información hidrológica diaria de la cuenca hidrográfica del río Jequetepeque, 1974-2010. Disponible en: www.jujr.org.pe/
- Komar, P.D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Latrubesse, E y Restrepo, J. (2014). The Role of Andean Rivers on global sediment yield: continental budget, regional variations, and comparisons with other basins from orogenic mountain belts. *Geomorphology*, 216, 225-233.
- Leceta, F. (2009). *Análisis de variabilidad temporal en geomorfología costera mediante la aplicación de métodos de teledetección y sistema de información geográfica: bahía de Miraflores*,

- Perú 1936-2005. Tesis de Licenciatura en Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Letras y Ciencias Humanas, Pontificia Universidad Católica del Perú. (Inédita)
- Leon, J. y Tavares Corrêa, C. (2006). Quantification in shoreline change in Salaverry, Peru. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39, ICS 2004 (Proceedings), 1013-1016.
- Macharé, J. y Ortlieb, L. (1993). Registros del fenómeno de El Niño. *Bulletin de l'Institut Français d' Études Andines*, 22, 35-52.
- Milliman, J. (2001). River Inputs. En A. Thorpe y K. K. Turekian (Eds.), *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 2419-2427), 2ª ed. Nueva York: Academic Press.
- Milliman, J. D. y Farnsworth, K. L. (2011). *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Milliman, J.D. y R.H. Meade (1983). Worldwide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91, 1-21.
- Milliman, J. D., Syvitski, J. P.M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *Journal of Geology*, 100, 525-544.
- Ministerio de Agricultura (1977). Transporte de Materiales en Suspensión en los ríos Jequetepeque, Chilite, Puclush. Dirección General de Irrigación. Proyecto Especial Jequetepeque-Zaña.
- Nicholls, R. J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J. O., Hay, J. E., McLean, R. F., Ragoonaden, S., Woodroffe, C. D. (2007). En Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., Hanson, C. E. (Eds.), *Coastal systems and low-lying areas Climate Change 2007: Impacts and Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 315-356). Cambridge: Cambridge University Press.
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales - ONERN (1988). Plan de Ordenamiento Ambiental de la cuenca del río Jequetepeque para la protección del reservorio Gallito Ciego y del valle agrícola. Diciembre 1988
- Peña, F. y Vargas, V. (2006). Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Jequetepeque: regiones Cajamarca y La Libertad. Anales del XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos, Sociedad Geológica del Perú, 467-470.
- Rondón R. G. (2011). *Análisis de la variación temporal de la línea de costa y caracterización de la geomorfología litoral: bahía de Paíta, Perú 1946-2007*. Tesis de Licenciatura en Geografía y Medio Ambiente, Facultad de Letras y Ciencias Humanas. Fecha de sustentación: 8 de julio de 2011. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/716>
- Slattery, M. C., Phillips, J. D. (2010). Controls on sediment delivery in coastal plain rivers. *Journal of Environmental Management*, 92, 284-289.
- Syvitski, J. y Kettner, A. (2011). Sediment flux and the Anthropocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369, 957-975.

- Syvitski, J. P. M. y Saito, Y. (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Glob. Planet. Changes*, 57, 261-282.
- Syvitski, J. P. M., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., Green, P. (2005). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308, 376-380.
- Syvitski, J. P. M., Peckham, S. D., Hilberman, R., Mulder, T. (2003). Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 162, 5-24.
- Tavares Corrêa, C. y Drenkham, F. (2010). Variación de la línea de litoral entre el puerto Chicama y Puémape, La Libertad, Perú (1961-2006). *Espacio y Desarrollo*, 22, 103-117.
- Tevez, N. (1982). Geomorfología del sector costanero comprendido entre los ríos Jequetepeque y Chamán. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 69, 71-82.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. y Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., das Neves, L., Pais-Barbosa, J. (2006). EUrosion – an European initiative for sustainable coastal erosion. Pilot Site of River Douro – Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores. IHRH, Porto, Portugal.
- Vörösmarty, C. J., M. Meybeck, B. Fekete, K. Sharma, P. Green, and J. Syvitski (2003). Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39, 169-190.
- Walling, D. E. (2006). Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79, 192-216.
- Wang, H., Saito Y., Zhang Y., Bi, N., Sun, X., Yang, Z., (2011). Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia. *Earth-Science Reviews* 108, 80-100.
- Warrick, J. A., Madej, M. A., Goñi, M. A. y Wheatcroft, R. A. (2013). Trends in the suspended-sediment yields of coastal rivers of northern California, 1955-2010. *Journal of Hydrology*, 489, 108-123.
- Woodman, R. y Mabres, A. (1993). Formación de un cordón litoral en Máncora, Perú, a raíz de El Niño de 1983. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 22(1), 213-226.
- Zhang, K., Douglas B. C. y Leatherman, S. P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climate Change*, 64, 41-58.

Fecha de envío: 12 octubre, 2015
Fecha de aceptación: 18 diciembre, 2015