

JOSEP E. PARDO-PASCUAL^a
JESÚS PALOMAR-VÁZQUEZ^b
CARLOS CABEZAS-RABADÁN^c

ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DE POSICIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN LAS PLAYAS DEL SEGMENTO VALÈNCIA-CULLERA (1984-2020) A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE RESOLUCIÓN MEDIA DE LIBRE ACCESO

RESUMEN

Las playas son espacios de suma importancia ecosistémica y socioeconómica, en numerosas ocasiones amenazados por procesos erosivos que ponen en riesgo su sostenibilidad. Este es el caso de la costa valenciana, en la que las acciones humanas juegan un papel esencial al alterar la disponibilidad y distribución del sedimento a lo largo de la costa. La cuantificación de los cambios morfológicos experimentados por las playas constituye el paso previo para entender su comportamiento y permitir la propuesta de actuaciones.

Las imágenes de los satélites de resolución media Landsat 5, 7 y 8, y Sentinel 2, han sido empleadas para extraer indicadores de la morfología de las playas del segmento València-Cullera como la posición de la línea de costa y su anchura entre mayo de 1984 y noviembre de 2020 (923 fechas).

Los resultados evidencian una tendencia erosiva generalizada causada en gran parte por la escasez de sedimentos en este sector costero. La acción humana aparece como la gran causante de este escenario

a Grup de Cartografia GeoAmbiental i Teledetecció, Departament d'Enginyeria Cartogràfica, Geodesia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022 València. España.

b Grup de Cartografia GeoAmbiental i Teledetecció, Departament d'Enginyeria Cartogràfica, Geodesia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022 València. España.

c Grup de Cartografia GeoAmbiental i Teledetecció, Departament d'Enginyeria Cartogràfica, Geodesia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022 València. España. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, F-33600 Pessac, France.carcara4@upv.es

Fecha de recepción: 17-02-2022. Fecha de aceptación: 04-05-2022.

erosivo mediante la reducción de la entrada de sedimento al litoral, la interrupción del transporte litoral asociada a las sucesivas ampliaciones del puerto de València, y el desarrollo de acciones directas sobre el sistema playa-duna. Asimismo, la entrada de sedimento al sistema litoral en forma de realimentaciones de arena sobre todo en las dunas costeras parece causar un impacto positivo en las playas del sector, si bien no provoca ensanchamientos sostenidos en aquellos lugares en que son realizados al presentar perfiles de playa ya excesivamente erosionados.

PALABRAS CLAVE: variabilidad de la línea de costa; erosión costera; monitorización de playas; temporales costeros; Landsat; Sentinel 2; déficit sedimentario; SHOREX.

STUDY OF CHANGES IN THE POSITION OF THE COASTLINE ON THE BEACHES OF THE VALÈNCIA - CULLERA SEGMENT (1984-2020) USING FREELY AVAILABLE MEDIUM RESOLUTION SATELLITE IMAGES

ABSTRACT

Beaches are spaces of great ecosystemic and socioeconomic importance often threatened by erosive processes that jeopardise their sustainability. This is the case of the Valencian coast, where human actions play an essential role by altering the availability and distribution of sediment along the coast. The quantification of the morphological changes experienced by the beaches is the first step towards understanding their behaviour and sustaining the proposal of actions.

Images from the mid-resolution Landsat 5, 7 and 8 and Sentinel 2 satellites are used to extract indicators of the morphology of the beaches of the València-Cullera segment, such as the shoreline position and the beach width between May 1984 and November 2020 (923 dates).

The results show a generalised erosive trend largely caused by the scarcity of sediments in this coastal sector. The main cause of this erosive scenario appears to be linked to the human action through the reduction of sediment input to the coast, the interruption of the coastal transport associated with the successive enlargements of the port of Valencia, and the development of direct actions on the beach-dune system. Likewise, the entry of sediment into the coastal system in the form of sand nourishments, especially in the coastal dunes, seems to have a positive impact on the beaches. Nevertheless, it does not cause sustained widening in those places where it is carried out, as the beach profiles are already excessively eroded.

KEYWORDS: shoreline variability; coastal erosion; beach monitoring; coastal storms; Landsat; Sentinel 2; sediment deficit, SHOREX.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad futura de las playas es una preocupación general asociada a su enorme interés ecológico, social y económico (Costanza et al., 1998) y a las amenazas que pueden pesar sobre ellas. Distintos autores han discutido y evaluado el riesgo potencial que las playas pueden experimentar a escala

global como consecuencia de las alteraciones provocadas por el cambio climático y el ascenso del nivel del mar (Vosdoukas et al., 2020), pero, obviamente, es evidente que además se han de tomar en especial consideración los condicionantes regionales y locales (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2002; Cooper et al., 2020). En el caso de las playas valencianas, cerca de una cuarta parte se encuentran afectadas por procesos erosivos (European Commission, 2009). Son muchas las aproximaciones realizadas en los últimos 35 años (Rosselló, 1986; Pardo-Pascual, 1991; Sanjaume et al., 1996; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019; Pardo-Pascual et al., 2019, 2021, 2022) en las que se ha evidenciado la enorme influencia que las acciones humanas, directas o indirectas, tienen sobre la evolución de las playas.

La mayor parte de estos estudios se han centrado en la comparación de la posición de la línea de costa registrada en fotografías aéreas adquiridas durante diferentes décadas. Esta fuente de información, si bien permite obtener un buen detalle de la posición de la orilla, presenta una frecuencia temporal baja. Esto impide diferenciar las variaciones provocadas por alteraciones del nivel del agua o por ajustes cíclicos del perfil de la playa a las condiciones del oleaje incidente respecto a aquellos otros, menos efímeros, asociados a alteraciones en el balance sedimentario local y que se detectan a más largo plazo. Ante la falta de fuentes de información adecuadas para afrontar el estudio de estos procesos de cambio, el empleo de imágenes de satélite, disponibles de forma gratuita y con una alta frecuencia de revisitado, se presenta como una gran oportunidad. Así, durante la última década se ha asistido a un desarrollo creciente y continuo de soluciones metodológicas e instrumentales (Pardo-Pascual et al., 2012, 2018; Bishop-Taylor et al., 2019; Vos et al., 2019; Sánchez-García et al., 2020) centradas en la extracción automática de la línea de costa partiendo de imágenes adquiridas en el rango óptico del espectro electromagnético con resolución espacial media (10 a 30 m de tamaño de píxel). Estas soluciones permiten disponer de una nueva perspectiva analítica en la que resulta posible reconocer de forma secuenciada las tendencias de cambio a lo largo de décadas (Nanson et al., 2022) registradas por las playas, así como su respuesta frente a eventos puntuales como los temporales, los vertidos y las extracciones de sedimento (Pardo-Pascual et al., 2014, 2021, 2022; Cabezas-Rabadán et al., 2019a,b)

Las playas de la restinga que encierran l'Albufera de València suscitan un gran interés tanto por sus indudables valores ecológicos como por la conflictiva historia que han mantenido frente a distintas actuaciones humanas. De hecho, si bien la Devesa del Saler históricamente ha sido uno de los tramos más protegidos del litoral gracias a que forma parte históricamente de una reserva de caza de la Casa Real, a mediados de los años sesenta del siglo xx sufrió una fortísima agresión cuando se intentó urbanizar en su mayor parte. La contestación social paralizó aquella alteración, y con posterioridad se han realizado múltiples intervenciones tendentes a renaturalizar el espacio (Benavent et al., 2004; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2011, 2019). Pese a ello, la acción humana que más ha afectado a las playas de este tramo ha sido la construcción y desarrollo del puerto de València. En la actualidad, esta infraestructura actúa como una barrera total para el transporte longitudinal de sedimentos que de forma natural tiene lugar de norte a sur del golfo de València (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019). Ello genera un déficit sedimentario en las playas localizadas al sur, lo que provoca el retroceso de la orilla y el aumento de la pendiente en el perfil emergido y sumergido de la playa. Ciertamente resulta evidente cómo las sucesivas ampliaciones del puerto realizadas a lo largo del siglo xx han ido ligadas a un incremento de los procesos erosivos al

sur de este (Pardo-Pascual, 1991). Sin embargo, existen dudas sobre si tanto las últimas ampliaciones o las que actualmente están previstas han supuesto o supondrán una exacerbación del impacto que sistemáticamente está causando en tanto en cuanto la infraestructura ya parece actuar en la actualidad como una barrera total al transporte. Por otra parte, los problemas erosivos en estas playas se han intentado resolver en las últimas décadas con aportaciones artificiales más o menos importantes de arena (Obiol-Menero, 2003). Más aún, en la Devesa del Saler se han combinado acciones de restauración dunar –buscando renaturalizar el paisaje– con aportaciones directas de arena a la playa (Benavent et al., 2004). Además, en las playas de la restinga se han llevado a cabo otras acciones antrópicas de menores dimensiones, pero que localmente pueden presentar importantes consecuencias, tales como la construcción de diques que protegen la desembocadura de las golas (especialmente en la gola del Perelló), paseos marítimos que constriñen las playas (como en el caso de las playas del Perelló o de les Palmeres). Finalmente, pero no menos importante, es necesario considerar que los ríos están aportando una cantidad muy baja de sedimento a todo el sistema costero valenciano debido a la regularización –por la acción de los embalses– de sus caudales por lo que la entrada de sedimentos al sistema ha disminuido respecto a lo que sucedía hasta hace unos setenta años (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019).

Este conjunto de intervenciones humanas define, pues, un escenario complejo a la hora de discriminar el efecto de cada una de ellas en la evolución del sector. Por otra parte, estudios recientes (Pardo-Pascual et al., 2022) evidencian que los procesos erosivos que hasta hace poco se circunscribían especialmente a la zona inmediata al puerto, ahora se han trasladado hasta playas más alejadas hacia el sur. Este es el caso de las playas adosadas al cabo de Cullera, que históricamente han seguido una evolución claramente acumulativa por estar apoyadas sobre otra barrera (esta natural) al transporte longitudinal, y que ahora experimentan retrocesos en la posición de la orilla.

La existencia de un marcado proceso erosivo que afecta a este gran tramo de litoral y a las funciones de sus playas (Cabezas-Rabadán et al., 2019c) requiere de una búsqueda activa de soluciones que permitan su sostenibilidad. Para ello, como paso previo resulta indispensable caracterizar los cambios registrados y determinar sus causas. Ante la compleja problemática existente, novedosas herramientas de teledetección como SHOREX (desarrollado por el grupo CGAT-UPV) permiten extraer de forma automática la posición de la línea de costa (*Satellite-Derived Shoreline*, SDS) y derivar indicadores de la morfología de las playas (Cabezas-Rabadán et al., 2019a) útiles para realizar un análisis holístico de los cambios ocurridos en este gran segmento costero a lo largo de diferentes décadas.

El presente trabajo propone determinar toda la secuencia continua de cambios de posición de la línea de costa ocurridos entre València y Cullera desde 1984 a partir de las imágenes Landsat y Sentinel 2 con el objetivo de tratar de comprender la naturaleza y las causas principales de los cambios que se han producido en este sector.

ZONA DE ESTUDIO

El análisis se focaliza sobre un segmento costero de 28 km de longitud que se extiende entre el puerto de València y el cabo de Cullera, y que ocupa prácticamente la totalidad del borde costero de la restinga

de l'Albufera de València (figura 1). Todo el segmento está formado actualmente por playas arenosas de tamaño fino o medio (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019). Este segmento funciona desde hace décadas como una célula sedimentaria abierta, es decir, está conectado sistémicamente por existir interrelaciones directas de sedimentos dentro de ella. El límite norte de esta célula sedimentaria queda establecido por los diques del puerto de València. Debido a sus grandes dimensiones, probablemente vienen actuando como una barrera completa al transporte de sedimentos hacia el sur desde principios del siglo xx. En

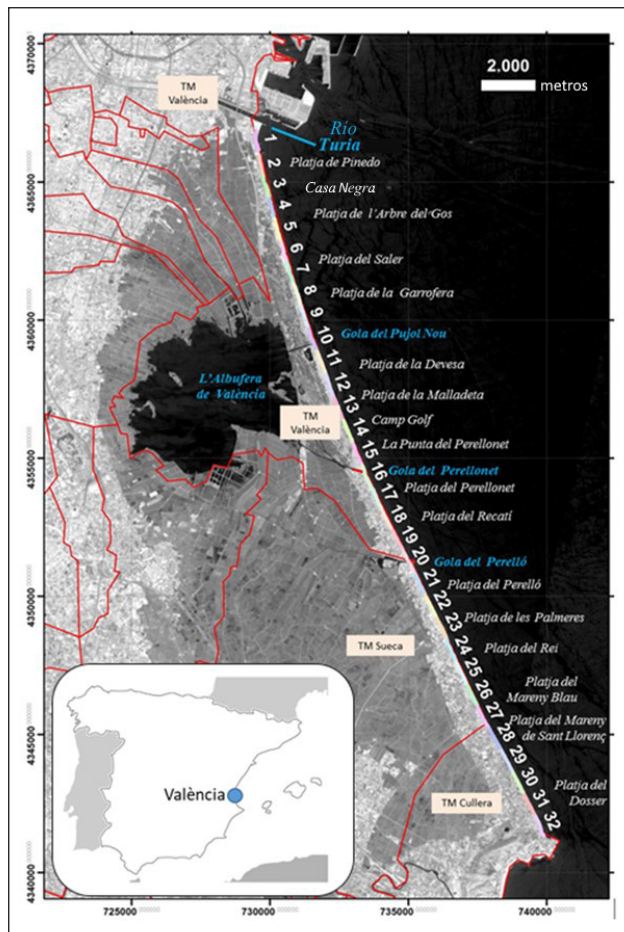


Figura 1. Zona de estudio localizada entre el puerto de València y el cabo de Cullera a lo largo de los términos municipales de València, Sueca y Cullera, nomenclatura de las playas y de las golas que conectan el lago de l'Albufera con el mar.

Fuente: Pardo-Pascual et al. (2022).

el límite meridional se sitúa el cabo de Cullera, que habitualmente actúa como una barrera natural al transporte, aunque en momentos de temporales fuertes puede permitir el traspaso de arena.

Se trata de una costa micromareal (rango de marea de 0,24 m) con un régimen de oleaje dominado por olas de escasa energía (altura significativa media de 0,7 m y periodo de pico medio de 4,2 s según se recoge en Cabezas Rabadán et al., 2021), aunque durante los temporales se pueden registrar olas de importantes dimensiones (en la boya oceanográfica situada frente al puerto de València durante el temporal Gloria, el 20 de enero de 2020 se alcanzó una altura de ola significativa de 8,67 m). Los oleajes de mayores dimensiones proceden del primer cuadrante, fundamentalmente de ENE y, en menor medida, del NE (véase sección 3.2), lo que dada la orientación de la costa da lugar a un fuerte transporte longitudinal de sedimentos hacia el sur. Es importante remarcar que, al tratarse de una costa formada por playas abiertas que se extienden a lo largo de kilómetros y con una orientación relativamente homogénea, este transporte adquiere un papel morfogénico sumamente eficiente.

METODOLOGÍA

El estudio se sostiene en el análisis sistemático de un amplio conjunto de datos integrado por 923 líneas de costa extraídas de las imágenes de satélite desde mayo de 1984 hasta noviembre de 2020. Estos datos proporcionan la información clave para el análisis sistemático de los cambios registrados desde la primera fecha mediante la creación de los modelos espaciotemporales de cambio de anchura de la playa. Por otra parte, se analizan aquellos factores naturales y artificiales que pueden potencialmente determinar la naturaleza, sentido y magnitud de dichos cambios, lo que ha de permitir establecer interrelaciones entre ellos.

Extracción de las líneas de costa derivadas de satélite y creación de modelo espaciotemporal de cambios de anchura de playa

Se han utilizado todas las imágenes libres de nubes registradas por los satélites Landsat 5, 7, 8 y Sentinel 2, lo que ha asegurado que para cada uno de los años analizados haya habido no menos de 10 SDS disponibles, si bien en algunos años se ha podido disponer de hasta 55 imágenes. El proceso de descarga, preprocesamiento, mejora de la georreferenciación espacial y extracción de la línea de costa se realizó utilizando el sistema SHOREX (Cabezas-Rabadán et al., 2021; Palomar-Vázquez et al., 2018) desarrollado en el seno del grupo de investigación de CGAT-UPV (<http://cgat.webs.upv.es/>). El núcleo central del sistema es un algoritmo de extracción automática de la línea de costa a nivel subpíxel descrito hace una década (Almonacid-Caballer, 2014; Pardo-Pascual et al., 2012), pero que con posterioridad se ha mejorado, ganando en precisión y eficiencia. Las SDS obtenidas con SHOREX son una secuencia de puntos situados en la orilla separados 7,5 m en el caso de imágenes Landsat y cada 5 m en el caso de las Sentinel 2.

El procedimiento de extracción aquí aplicado fue descrito en detalle por Sánchez-García et al. (2020), quienes evaluaron la precisión de 91 SDS en la playa de Cala Millor (Mallorca) empleando

como referencia líneas derivadas de un sistema de videomonitorización. El error medio cuadrático de las SDS obtenidas de las imágenes Sentinel 2 fue de 3,01 m y de 3,59 m en el caso de las Landsat 8.

En el presente trabajo, para analizar las 923 SDS extraídas se han generado los modelos espacio-temporales de anchura de playa (MET) y de cambios de anchura de playa, tal y como se propone en Cabezas-Rabadán et al. (2019a). Estos modelos se nutren de los datos de anchura de playa, obtenidos en cada una de las fechas en que se dispone de SDS. Las anchuras se definen como la distancia entre los puntos que constituyen las SDS y el borde interior de la playa previamente fotointerpretado sobre una ortofoto de alta resolución. Dicha línea, a su vez, se ha dividido en segmentos de 60 m, en cada uno de los cuales se define una anchura media de playa para cada fecha en que hay una SDS disponible. Esta información se organiza en un sistema cartesiano en el que en el eje de las Y se introducen los sucesivos segmentos de playa y en el eje de las X el valor de anchura en cada fecha. La interpolación de estos valores permite definir un continuo espaciotemporal de anchuras de playa a lo largo del litoral. De forma homóloga resulta posible definir un MET de cambios de anchura respecto a la primera fecha con datos disponibles. Además, y con la finalidad de interpretar con mayor claridad los procesos, se ha generalizado esta información dividiendo el territorio en tramos de 900 m de longitud y el periodo temporal en años naturales. De esta forma se han obtenido también un MET de anchura media anual de playa por tramos, y un MET de cambio de anchura media anual por tramo.

Condiciones del oleaje

El oleaje es el agente natural que controla de forma más clara los procesos evolutivos de estas playas. Para analizar sus efectos se han utilizado los registros horarios del punto 2081114 de la red SIMAR de Puertos del Estado, concretamente los registros horarios modelizados entre enero de 1984 y noviembre de 2020 (figura 2A). En este periodo existe un dominio de las condiciones de olas con altura significativa menor a 1 m, aunque también se han registrado episodios de alta energía. A lo largo del periodo estudiado se puede reconocer un aumento muy sustancial en la frecuencia de los temporales que afectan a la zona, especialmente aquellos de mayor magnitud (figura 2B). Se puede observar cómo hasta el temporal de noviembre de 2001 no había ningún caso en que se alcanzasen alturas significativas mayores a 3,5 m, pero desde entonces se pueden reconocer once episodios, entre los que destaca el temporal Gloria en enero de 2020.

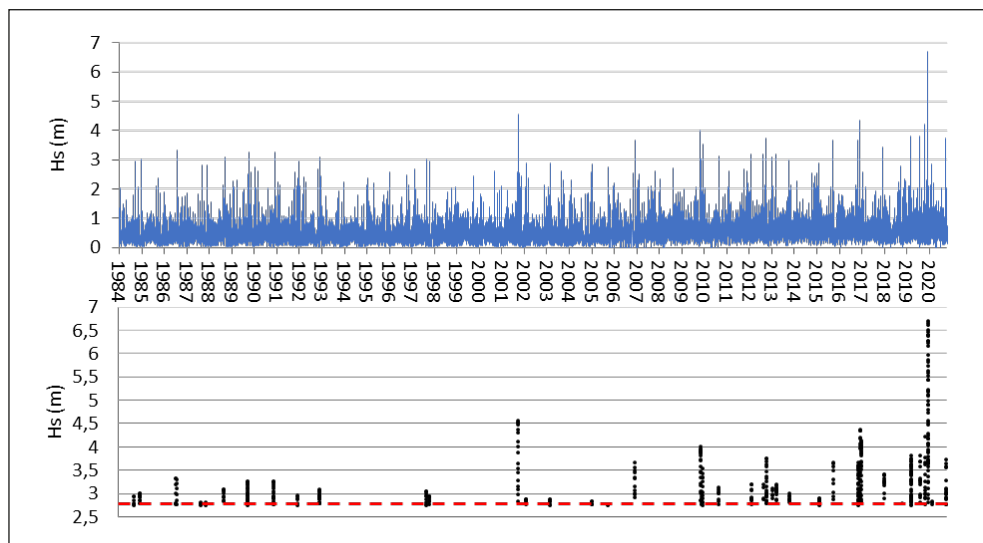


Figura 2. En la parte superior (A) se muestra la evolución horaria de las alturas significativas de ola a partir de los registros horarios de uno del punto SIMAR 2081114 de Puertos del Estado (<https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>). En la parte inferior (B) se identifican aquellos bloques horarios en que la altura significativa supera los 2,75 m, lo que se asocia a episodios de temporal de mayor energía.

Actuaciones humanas

La acción humana juega un papel esencial sobre la disponibilidad y distribución de sedimentos en las playas del sector y presenta distintos tipos de procedencia. Principalmente, se encuentra la acción de las grandes estructuras como el puerto de València, aunque en una medida mucho menor los espigones de defensa de las golas de Perelló, Perellonet, Pujol y Séquia del Rei también presentan una importancia nada desdeñable. Trabajos previos (Pardo-Pascual, 1991; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019) han analizado cómo el proceso de crecimiento del puerto fue alterando radicalmente la morfología de las playas inmediatas desde prácticamente principios del siglo XIX y sobre todo durante el siglo XX. Este trabajo centra la atención en reconocer los cambios en la fisonomía del puerto durante el periodo considerado (1984-2020).

Otro factor humano clave para comprender la evolución de este sector costero es la disminución de los aportes sedimentarios de origen fluvial, sobre todo en la cuenca del río Túria. Es evidente que la retención de sedimentos que provocan los embalses construidos durante el siglo XX en la cuenca supone una merma significativa en la entrada de nuevos sedimentos dentro de la célula sedimentaria. Cobo (2008) estimaba en 6,66 hm³ los sedimentos retenidos en el vaso del pantano de Benagéber en sus primeros 37 años de funcionamiento, y de 0,8 hm³ en el pantano del Buseo, ambos en la cuenca del río Túria. Si bien solo una fracción de estos sedimentos serán de arena, es evidente que se trata de un volumen muy elevado e ilustra la influencia que este factor tiene sobre la evolución de las playas del sector.

Finalmente, se debe resaltar un tercer tipo de acción humana que de forma directa ha influido en su evolución: el aporte de sedimentos artificiales, tanto directamente sobre la playa como en las primeras alineaciones dunares que, a medio plazo, puede haber aportado sedimentos a la célula sedimentaria. Describimos ahora con detalle cómo ha evolucionado el puerto y cómo se han distribuido las principales aportaciones sedimentarias de carácter artificial.

Evolución del puerto de València

A lo largo de los 37 años analizados, el puerto de València ha experimentado numerosos cambios que han supuesto una modificación de su configuración externa (figura 3) y que, por tanto, han afectado a las condiciones de oleaje tanto en las playas del norte como del sur. La situación inicial es la que se observa en 1984 y así se mantiene hasta la primavera de 1992, cuando se inicia la construcción de lo que posteriormente será la dársena sur. El dique sur se va alargando progresivamente y en el verano de 1993 prácticamente está finalizado en su parte exterior. Las obras continuaron materializándose de forma casi definitiva en el verano de 1996, cuando la dársena interior estaba casi finalizada.

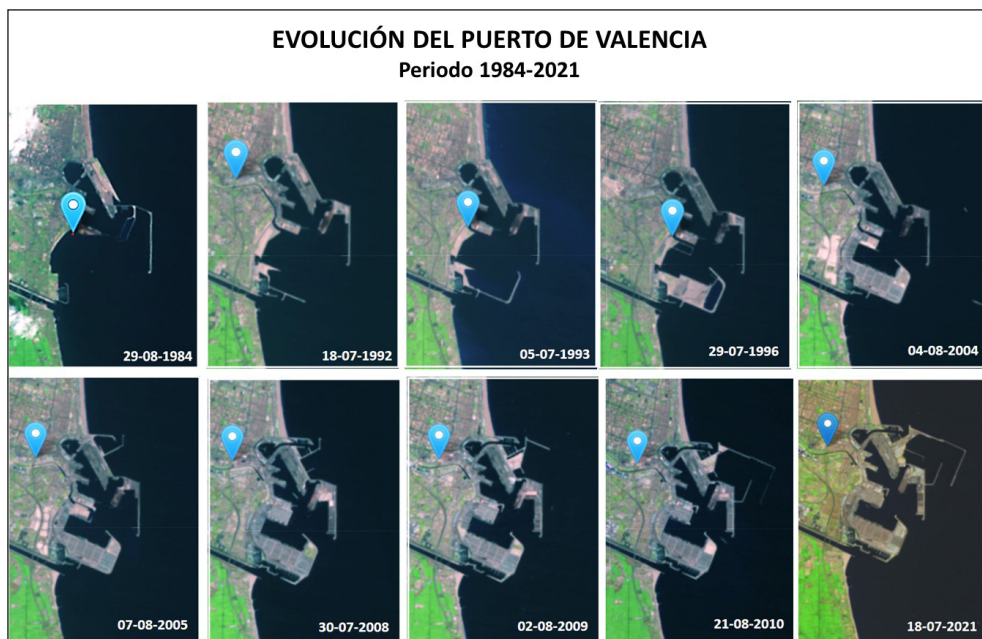


Figura 3. Evolución de la fisonomía exterior del puerto de València entre 1984 y 2021.

Fuente: imágenes de la serie Landsat tomadas del servidor del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

El siguiente cambio en la fisonomía externa del puerto de València se produce durante 2005, cuando se construyen los diques de lo que será la nueva conexión norte a lo que posteriormente se ha deno-

minado la Marina Real, asociado a la competición náutica de la Copa del América que se celebró en 2007. Una vez finalizado dicho evento, en verano de 2009 se iniciaron de nuevo las obras de lo que se convirtió en la ampliación norte y que duraron, por lo que respecta a los diques exteriores, hasta 2010. Desde entonces la fisonomía externa del puerto ha permanecido sin cambios.

Tomando en consideración que el puerto de València en todo el periodo estudiado ha estado actuando como una trampa sedimentaria completa para el transporte de sedimentos asociado a la deriva litoral dominante (N-S), el efecto de los cambios en su fisonomía se relacionará sobre todo con la alteración que cada uno de los cambios en la infraestructura ha supuesto en el efecto de sombra del oleaje.

Aportes artificiales de sedimentos

A lo largo del periodo de estudio se han realizado múltiples aportaciones a la zona sumando un total de 2.130.962 m³ de arena. Estos aportes han presentado una muy desigual distribución tanto geográfica como temporal (tabla 1, figura 4), siendo en ocasiones actuaciones sobre la playa y en otras para la recreación de dunas.

Tabla 1. Volumen total de sedimentos aportados en los distintos tramos de la zona de estudio (véase figura 1).

Fuente: Datos procedentes de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar (MITECO).

Código	Tramo	Volumen (m ³)
1	Pinedo	83.000
3	L'Arbre del Gos	55.594
5	La Creu	14.268
6	Saler	541.075
9	Ferros-Garrofera	576.465
12	Brava-Devesa	672.500
13	Malladeta	31.740
22	Palmeres	76.482
24	Gola del Rei	6.500
31	Dosser	73.338
	TOTAL	2.130.962

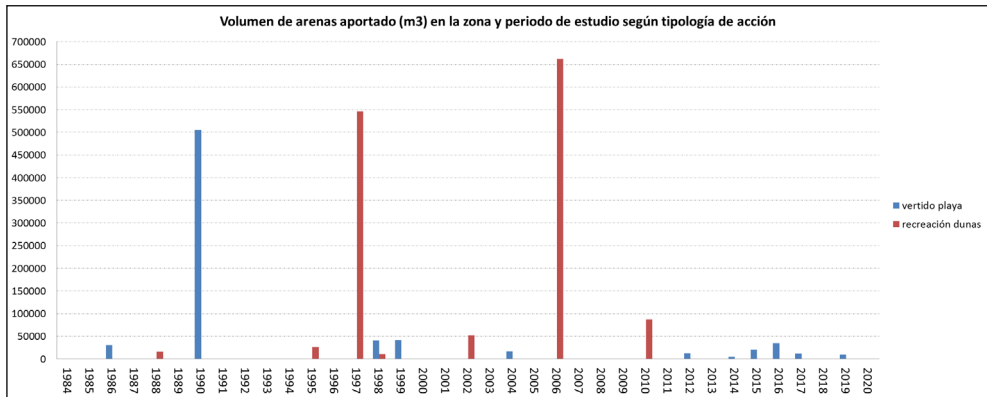


Figura 4. Distribución temporal de los aportes artificiales de arenas (volumen en m³) a lo largo del periodo de estudio. En azul se muestran los aportes a la playa, mientras que en rojo aparecen aquellos destinados a la recreación dunar. Fuente: datos procedentes de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar (MITECO).

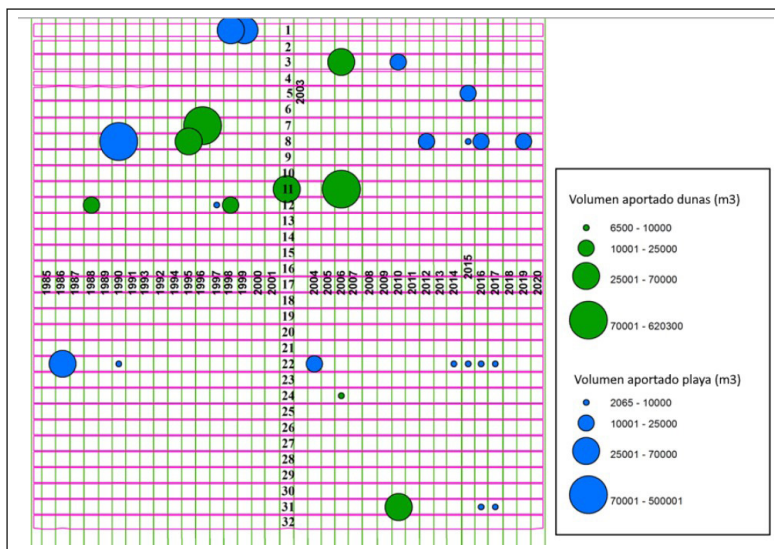


Figura 5. Distribución espaciotemporal de las aportaciones artificiales de arena diferenciando entre los aportes directos a la playa y aquellos utilizados para la reconstrucción de dunas. Fuente: datos procedentes de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar (MITECO).

Ha sido en el sector norte de la zona estudiada donde se han realizado un mayor número de aportes y también de mayor magnitud (figura 5). Asimismo, se reconoce que el volumen aportado ha sido bastante mayor durante la parte central del periodo estudiado frente a lo que se introdujo antes de 1990 y después de 2010.

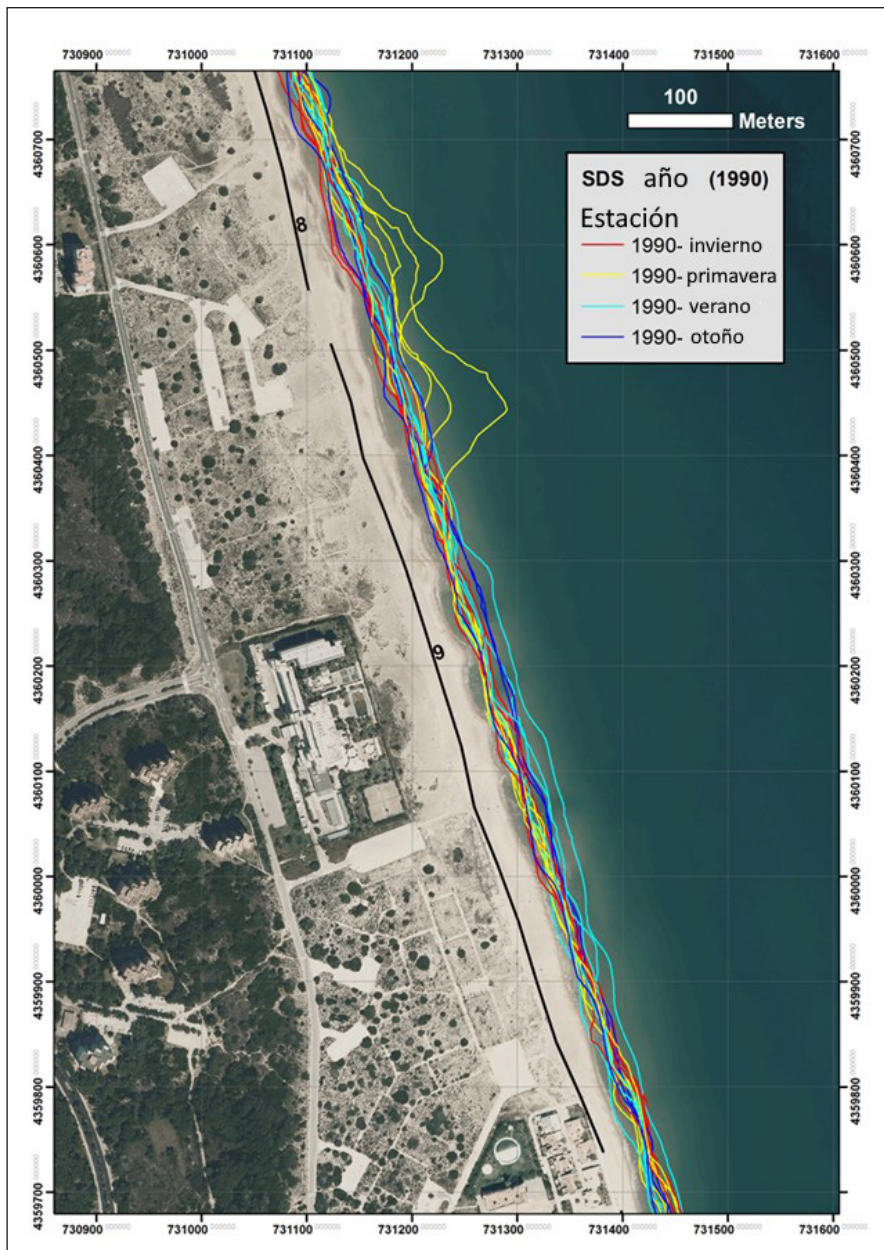


Figura 6. Conjunto de SDS detectadas a lo largo de 1990 entre la playa de Els Ferros y de la Garrofera. Los colores se asignan a cada estación del año. Se aprecia –color amarillo– la clara morfología de la fisionomía de la playa durante la primavera como consecuencia del vertido de 500.000 m³ de arena muy fina, y cómo a lo largo del verano su efecto en la zona representada prácticamente desaparece. La ortofotografía usada como fondo procede del Institut Cartogràfic Valencià.

El mayor aporte a la playa directamente se produjo en 1990 en las playas de Els Ferros y Garrofera en el que se vertieron 500.000 m³ al final de la primavera. El efecto de este aporte queda claramente reflejado en las SDS extraídas durante la primavera (figura 6). No obstante, tras el principio del verano, en que todavía se apreciaba un claro incremento de anchura al sur de la zona de vertido, la anchura de la playa retornó a su anchura anterior. Buena parte de esta arena se tomó de los fondos situados frente a las playas situadas al norte del puerto de València por lo que el calibre de las arenas era sustancialmente menor al de la playa que se estaba regenerando.

Destacan otras dos grandes zonas con aportación de arenas: la primera centrada en las playas del Saler entre 1996 y 1999 y la segunda, inmediatamente al sur de la gola del Pujol (playas de la Brava y Malladeta), en dos fases (2002 y 2003, y de 2007 a 2010). Entre 1996 y 1999 se dismanteló el paseo marítimo de la playa del Saler construido durante el proceso de urbanización a finales de los años sesenta y principios de los setenta del siglo pasado (Benavent et al., 2004; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2011, 2018). Asimismo, se construyeron dos alineaciones de dunas con una morfología un tanto singular (las conocidas como “dunas flan”). Para ello se utilizaron 291.929 m³ de la playa de la Malva-rosa de València y 249.146 m³ del vaciado de las *mallades* internas. En este caso, a diferencia de lo ocurrido con el vertido directo a la playa, las SDS no marcan variaciones bruscas que evidencien estas aportaciones debido a que, en realidad, no se han hecho en la orilla sino algunas decenas de metros tierra adentro.

Las aportaciones de arena en el tramo de la playa de la Brava y de la Malladeta habían sido modestas antes del año 2000 y se hicieron sobre todo con la pretensión de renaturalizar el espacio dunar artificializado durante las acciones urbanizadoras de la década de los setenta. En la playa de la Malladeta, en 1988, se cubrió el paseo marítimo preexistente con 16.000 m³ de arena, procedente de las malladas, lagunas y de calderas de abrasión, para formar una duna de 5 m de altura. Asimismo, a finales de los años noventa se opta por eliminar el paseo marítimo, para lo que se procede a desmontar la duna y regenerarla empleando más de 15.000 m³ de arena, lo que da lugar a un cordón de 20 m de anchura.

Al norte de la playa de la Malladeta (justo al sur de la gola del Pujol, en la playa de la Brava y Malladeta norte) las acciones más importantes se dieron entre 2001 y 2008. La primera de estas fases continúa la labor llevada a cabo en las zonas al sur, eliminando el paseo y reconstruyendo la duna, empleando 52.500 m³ de arena mientras que la última fase, a partir de 2004, consiste en el empleo de más de 620.000 m³ de arena procedente del vaciado de calderas, malladas y lagunas, para proceder a reconstruir la morfología dunar de la zona de transición (estas acciones las llevó a cabo el Ajuntament de València en el marco de los proyectos europeos LIFE-DUNA y LIFE-ENEBRO).

En la parte meridional de la restinga el volumen de arenas –tanto para playas como para regenerar las dunas– ha sido sustancialmente menor. Buena parte de ellas se han aportado a la playa de les Palmeres en un sector en el que se ha realizado una urbanización inmediata a la orilla, lo que ha provocado un constreñimiento artificial de la playa. Los mayores aportes en dicha zona se hicieron en 1986, año en que se vertieron más de 30.000 m³ de arena. Con posterioridad se hicieron pequeños aportes en los años 1990 y 2004 y también entre 2013 y 2017, con un vertido de 23.900 m³. En la playa del Dosser en 2010 se realizó un trabajo de recuperación del sistema dunar con un aporte de 66.269 m³ y se aportaron en esta zona de nuevo arenas en 2016 y 2017, pero en cantidades sustancialmente inferiores (unos 7.000 m³).

RESULTADOS

El análisis de las 923 posiciones de la línea de costa muestra un importante ensanchamiento de las playas localizadas en una estrecha franja situada justo en la parte norte de la zona de estudio. Allí se aprecian ganancias de más de 190 m. Sin embargo, inmediatamente al sur de esta zona de ganancias (señalada con una línea discontinua en la figura 7) se encuentra una amplia área-periodo en la que se registran las mayores pérdidas (que en algún segmento supera los 125 m).

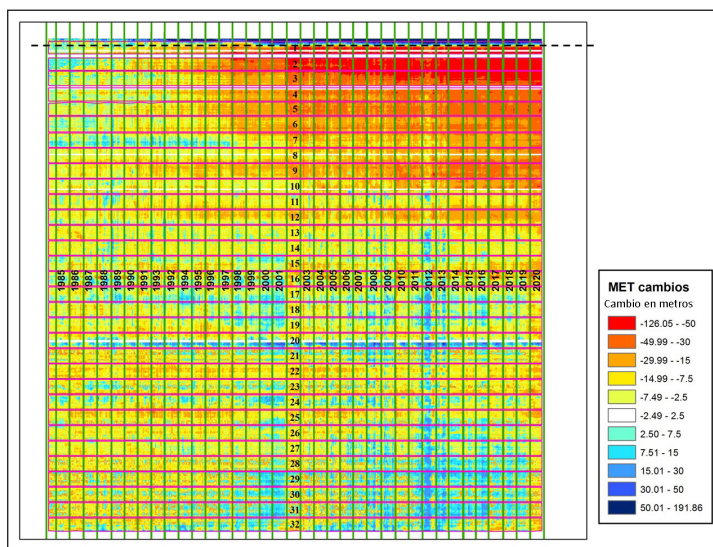


Figura 7. Modelo espaciotemporal de cambios en la anchura de playa en cada segmento de 60 m en cada una de las 923 fechas analizadas respecto a la primera de la que se dispone de datos (25/05/1984). En tonos fríos se señalan las ganancias y en tonos cálidos las pérdidas.

El estrecho sector norte –señalado en el gráfico por una línea negra discontinua– que ha tenido fuertes ganancias está justo en los primeros 1200 m al sur de la desembocadura del Túria y su evolución se relaciona directamente con el fuerte recrecimiento de la playa adosada a la desembocadura del nuevo cauce del Túria causada por el vertido de 83.000 m³ de arena en los años 1998 y 1999 y la introducción a finales de 2001 de dos espigones al sur del tramo de Pinedo que impiden que la arena situada al norte se pueda desplazar hacia el sur.

El resto de la zona presenta también cambios muy importantes, pero aquí existe un predominio generalizado de las pérdidas sobre todo en la parte norte, es decir, hasta el tramo 15 correspondiente con la Gola del Perellonet, mientras que en la mitad sur (entre la gola del Perellonet y el cabo de Cullera) existen pérdidas claras en los primeros años, pero también ganancias en la parte central del periodo estudiado, si bien durante el último año de nuevo se observan fuertes pérdidas en todos los lugares. El

análisis detallado del MET de cambios (figura 7) permite reconocer múltiples detalles como los efectos que los principales temporales han causado en todas las playas. Así, tras el temporal de noviembre de 2001 se aprecia en todo el sector una pérdida clara de anchura de la playa: obsérvese como en 2000 y 2001 predominan, sobre todo al sur de la gola del Perellonet, los tonos azules, lo que indica ganancias de entre 2,5 y 15 m y en 2002; tras los fuertes temporales de noviembre de 2001, predominan los tonos amarillos y naranjas (con pérdidas de entre 7,5 y 30 m). Ello vuelve a repetirse tras los temporales de finales de 2009, los de finales de 2012, el de enero de 2017 y, sobre todo, tras los temporales de finales de 2019 y enero de 2020. En este último año, sobre todo como consecuencia del temporal Gloria, observamos una pérdida generalizada en todos los tramos analizados que resaltan respecto a lo que observábamos en años anteriores, especialmente en la parte meridional.

Por otra parte, también se aprecian sectores geográficos que tienen una tendencia claramente distinta al resto. En el sector 20 (gola del Perelló) se aprecia la ganancia (línea de tono azul) que de forma general está provocada por el efecto de trampa sedimentaria que tiene el dique norte de la gola-puerto del Perelló.

Para interpretar de forma más clara los cambios que las playas han tenido en el periodo de estudio se ha promediado las anchuras a escala anual sobre cada uno de los 32 tramos de 900 m definidos con anterioridad y mostrados en la figura 1. En este caso, los cambios medidos se han calculado respecto a la anchura media de cada tramo en el momento inicial del periodo (año 1984). Este nuevo modelo se muestra en la figura 8 y resume de forma simple los cambios observados y muestra muy claramente cómo la tendencia erosiva es dominante pero moderada en los primeros años en toda la zona estudiada (exceptuando el tramo 32, junto al cabo de Cullera). Sin embargo, a partir de 1992 los procesos erosivos inmediatamente al sur del puerto se van acelerando y desplazando progresivamente hacia el sur. Las pérdidas son máximas en los tramos 2 y 3 pero podemos señalar que son fuertes (pérdidas de más de 15 m de anchura) en la playa de la Devesa (tramo 12) y que en los últimos años ha alcanzado claramente a las playas de la Punta (15) y Perellonet (16). En la mitad meridional, sin embargo, a partir de 1997 se van apreciando áreas con avances claros que se hacen más obvios en años con condiciones de oleaje relativamente tranquilo (años 2000, 2012, 2013 y 2015).

A partir de este modelo promediado a escala anual y sobre los 32 tramos se ha podido hacer un balance sedimentario de cada uno de los tramos durante el conjunto del periodo analizado (figura 9) en el que se cuantifican las pérdidas y ganancias registradas, evidenciándose que la mitad norte (hasta el tramo 16 –gola y playa del Perellonet–) ha tenido pérdidas en todos sus tramos, siendo estas mucho más importantes junto al puerto y progresivamente haciéndose menos abultadas hacia el sur. En la mitad meridional el balance es mucho más equilibrado, con prácticamente la mitad de los tramos con ganancias. Sí que es interesante observar que las tendencias positivas predominan en el extremo sur.

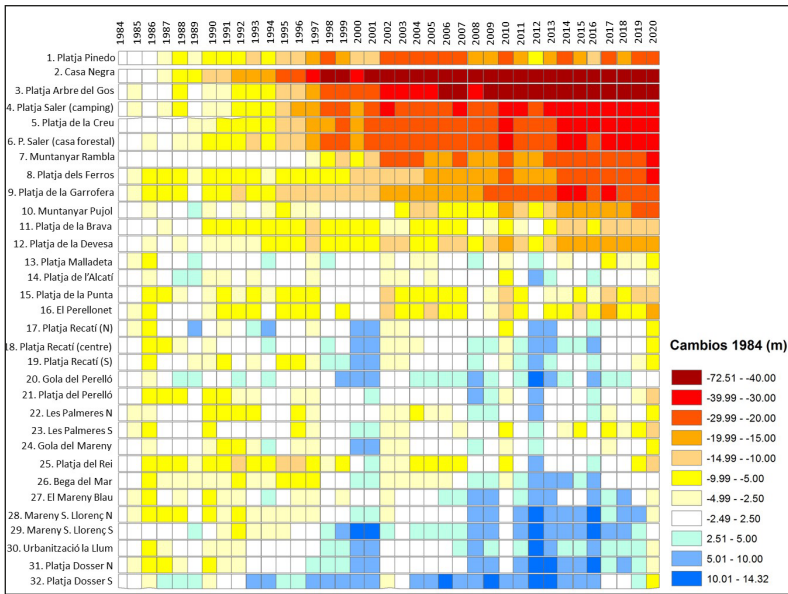


Figura 8. Modelo espaciotemporal de cambios generalizado a valores medios anuales y sobre cada uno de los 32 tramos diferenciados. El cambio aquí se mide comparando la anchura media de cada año en cada tramo respecto a la anchura media que ese tramo tenía en 1984.

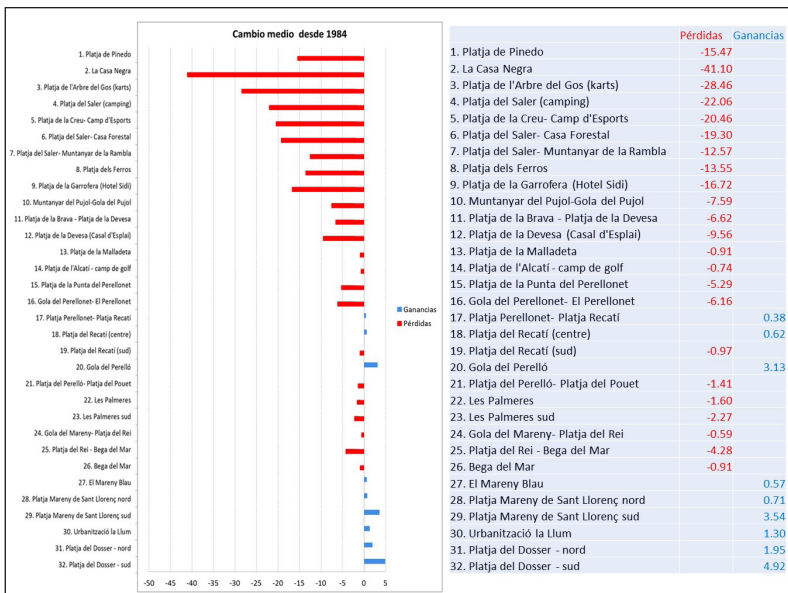


Figura 9. Balance sedimentario de cada tramo de playa desde 1984 hasta 2020.

Con la finalidad de comprender más claramente cuál ha sido el balance sedimentario en los 32 tramos en que se ha subdividido el sector estudiado, se han diferenciado los cambios en tres periodos sucesivos de aproximadamente la misma duración (figura 10): de 1984 a 1996 (13 años), de 1997 a 2008 (12 años) y de 2009 a 2020 (12 años). En la tabla 2 y en la figura 10 se compara el cambio acumulado en los tres periodos considerados y los balances de los cambios de superficie.

Llama especialmente la atención el muy distinto comportamiento registrado en el segundo periodo respecto a lo visto en el primero y tercero, si bien entre estos también hay diferencias. Tanto en el primer como en el tercer periodo hay 29 de los 32 tramos analizados que han registrado pérdidas y el balance sedimentario en ambos periodos es sumamente parecido (algo mayor a 9 ha de pérdidas). La principal diferencia entre estos dos periodos viene dada porque en el primer periodo se registran fuertes pérdidas tanto en el segmento norte como en el sur (excepto el último tramo que es claramente positivo), siendo más o menos estable el tramo central. El periodo más reciente sigue siendo erosivo en la mitad norte (pero no necesariamente en el extremo norte, donde la máxima pérdida se da en el Muntanyar de Pujol-gola de Pujol, tramo 10), mientras que la zona más meridional ahora es básicamente estable (de nuevo exceptuando el tramo 32, en la playa del Dosser de Cullera, que ahora tiene fuertes pérdidas).

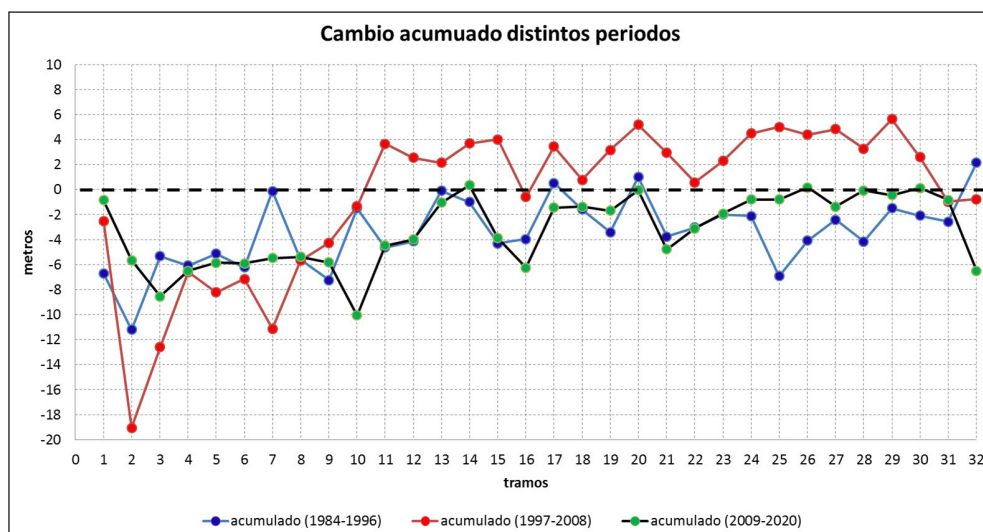


Figura 10. Cuantificación del cambio de posición de la línea de costa acumulado a lo largo de diferentes periodos.

Tabla 2. Balance del cambio de superficie de playa (en hectáreas) por periodos.

	Periodo 1984-1996	Periodo 1997-2008	Periodo 2009-2020
N.º tramos negativos	29	13	29
Superficie perdida (ha)	-10.16	-7.28	-9.43
N.º tramos positivos	3	19	3.00
Superficie ganada (ha)	0.33	5.83	0.06
Balance superficie (ha)	-9.83	-1.45	-9.37

En el periodo central (1997-2008), como revela la tabla 2, el comportamiento es diferente. Las pérdidas son mucho menores (1,45 ha frente a las más de 9 que se pierden en los otros dos periodos) y, además, en la mayoría de los tramos se registra un comportamiento acumulativo. Ahora bien, también es en estos años cuando se exacerban más los procesos erosivos en los tramos inmediatos al puerto (Casa Negra, Arbre del Gos).

FACTORES DE CAMBIO: ACCIÓN ANTRÓPICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados expuestos evidencian que el principal factor que controla la evolución del sector analizado es la interrupción del transporte longitudinal de sedimentos provocado por los diques del puerto de València. La presencia de este obstáculo, unida a la gran magnitud del transporte natural de sedimentos hacia el sur, provoca el arrastre del sedimento de las playas al sur del puerto, el cual no puede ser reemplazado por el sedimento localizado en las playas al norte. Esto genera un déficit sedimentario local que morfológicamente se traduce en un incremento de la pendiente de la playa sumergida, un aumento de la textura de los sedimentos y un retroceso de la línea de costa. Este fenómeno viene sucediendo desde el momento en que el puerto de València se convirtió en una barrera completa a la deriva litoral, por lo que constituye un factor importantísimo y constante a lo largo de todo el periodo estudiado. Resulta sumamente relevante observar cómo durante los primeros años analizados, los anteriores a la gran alteración en la fisonomía del puerto ligada a la construcción de la dársena sur (1992), toda la zona de estudio ya seguía una tendencia negativa. En esos momentos solo actuaba el efecto de trampa sedimentaria de los diques del puerto y la falta de aportes de nuevos sedimentos procedentes del río Túria.

Una cuestión importante, sin embargo, es establecer cómo han afectado a la evolución de las playas situadas al sur los distintos cambios en la fisonomía exterior del puerto de València. Para ello será crucial conocer hasta dónde puede alcanzar la sombra del oleaje de cada modificación de la infraestructura portuaria. Desde este punto de vista, la apertura de la entrada a la Marina Real de 2005 no ha podido tener ningún efecto sobre las playas del sur (si bien sobre las del norte sí que lo ha tenido y muy elevado). Respecto a las otras dos actuaciones (diques de la dársena sur hechos entre 1992 y 1993 y la ampliación norte, realizada entre 2009 y 2010) sí han podido tener influencia, pero de manera muy distinta. En la figura 11 se presentan las proyecciones de la sombra que ejercen estas dos actuaciones y se muestran,

también, las frecuencias de oleaje según dirección y altura significativa de ola. Así, el dique de la dársena sur protege el tramo 1 (Pinedo) de la llegada de oleajes procedentes de orientaciones menores a 50° . Por su parte, la ampliación norte (2009-10) deja protegida una zona bastante mayor (hasta el tramo 6 –playa del Saler-Casa Forestal–), pero solo para los oleajes que procedan de posiciones cercanas al norte puro (solo hasta los 20° N).

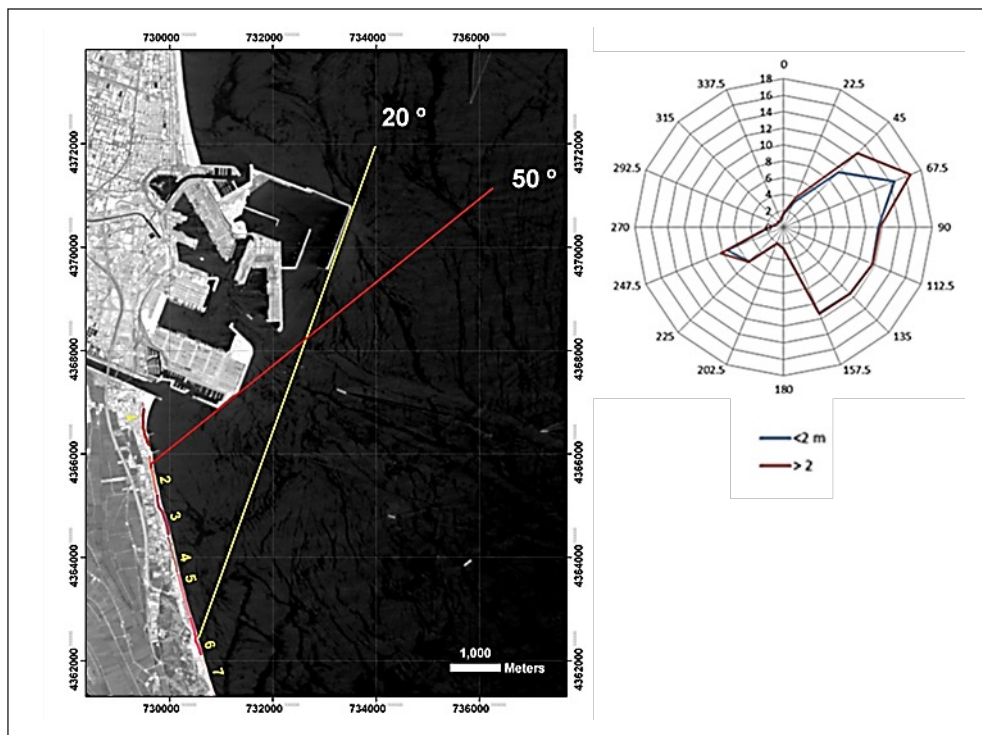


Figura 11. Zonas de sombra creadas por las dos ampliaciones habidas en el periodo estudiado que afectan a la zona sur. Ángulo límite de la protección sobre las playas del sur respecto a los oleajes del primer cuadrante. Frecuencia con que se dan olas de altura significativa mayor y menor a 2 m según la dirección de procedencia. Fuente: datos de oleaje procedentes de Puertos del Estado.

Resulta evidente que la ampliación sur del puerto va ligada a una fortísima regresión en la línea de costa de las playas al sur. Desde 1992 se inicia una progresiva aceleración de los procesos erosivos (figura 8) que, con el paso de los años, se van detectando de forma cada vez más evidente en tramos situados cada vez más al sur. En la figura 4 se muestra cómo con la ampliación del dique sur el primer kilómetro de playas situado al sur del puerto se queda dentro de la zona de sombra frente a los oleajes de mayor energía (NE y ENE). A su vez, dada la orientación de la costa en dicho punto, las olas procedentes del E provocarán un transporte hacia el norte, lo que causa que en el tramo 2 y 3 el déficit se exacerbe debido

a la migración de la arena, tanto hacia el norte (situaciones de olas procedentes del E y del segundo cuadrante) como hacia el sur, con olas del primer cuadrante. Este hecho es el que provoca que a partir del momento en que se construye esta infraestructura la erosión se incrementa enormemente en el tramo de la Casa Negra. Así, hasta 1993 se habían perdido 15 m, pero entre ese año y 1998 había llegado a perder 43 m (28 más en 5 años). Durante este y el siguiente año se iniciaron los vertidos de 83.000 m³ de arena en la playa de Pinedo y parece claro que parte de ese sedimento podría haber llegado a la Casa Negra y más hacia el sur. Entre 1998 y 2001 la playa en la Casa Negra incluso registra un pequeño aumento de anchura. Ahora bien, entre 2001 y 2002 se pierden casi 15 m, en este caso probablemente por el fortísimo impacto de los dos temporales de noviembre de 2001. Sin embargo, tras este retroceso, este tramo permanece prácticamente estable hasta 2017, cuando por efecto de los grandes temporales volvió a sufrir un ligero retroceso. La fuerte pérdida entre 1993 y 1998 se aprecia también en los tramos 3 a 6, si bien con magnitudes significativamente menores. Al sur del tramo 6, los efectos erosivos ya no se inician en 1993 sino más tarde, siendo menos agresivos y perdurando más en el tiempo. Por tanto, en estos lugares ya no queda claro si la construcción del dique de la dársena sur del puerto sería la causante principal de los retrocesos o si, en realidad, lo que se detecta es la tendencia subyacente que ya se apreciaba en los años anteriores a su construcción.

Por su parte, la ampliación norte del puerto (2009-2010) no deja un efecto, ni mucho menos, tan claro como el observado en la ampliación sur. Ciertamente en muchos casos se aprecia un retroceso el año 2010 respecto a 2009, pero parece que ello está mucho más ligado al impacto de los temporales de finales de 2009, ya que, además, pasado el año 2010 se registra una recuperación de la anchura de la playa en todos los tramos.

Respecto a la influencia de las aportaciones artificiales de arena en la morfología de las playas, se aprecia un escaso efecto directo que se percibe sobre la anchura de playa (figuras 8 y 9). El vertido de 500.000 m³ de arena muy fina en las playas de Els Ferros y la Garrofera en la primavera de 1990 provocó una rápida ampliación de las playas, aunque unos pocos meses más tarde su efecto ya había desaparecido. Respecto al resto de las grandes aportaciones no hay señal obvia en la posición de la orilla, ya que estas no se hicieron en la playa, sino que se destinaron a rehacer (o directamente para construir) alineaciones dunares. De los resultados mostrados parece obvio deducir que estos aportes no han ensanchado la playa donde se hizo la actuación, pero probablemente sí que han tenido efecto, y muy marcado, dentro del conjunto de la célula sedimentaria. El análisis de los tres periodos en que se ha subdividido la zona de estudio ha evidenciado cómo en el periodo intermedio (1997-2008), en el que se produjeron el grueso de las grandes aportaciones para la reconstrucción de dunas, tiene lugar un claro avance de la orilla en los tramos meridionales de la zona de estudio. Esta ganancia en anchura en el sector central y sur que durante el primer periodo y tercer periodo han tenido una dinámica erosiva solo se puede explicar porque ha recibido un incremento de aporte sedimentario. Su origen se encuentra necesariamente en las aportaciones hechas en esos mismos años o en los inmediatos anteriores en los sectores situados más al norte. El transporte longitudinal habría arrastrado parte del nuevo material y este se habría acumulado donde la playa presenta menor pendiente. Por tanto, las aportaciones arenosas no serían completamente

ineficaces, como podría aparentar el análisis de los MET, sino que en buena parte constituye un aporte de sedimentos que se detecta en aquellas partes de la célula sedimentaria costera que pueden retenerla. En realidad, estos vertidos de arenas suponen una nueva entrada de sedimento dentro del sistema costero litoral. Tal y como muestran los resultados sí que causan un impacto positivo, si bien no necesariamente en los lugares donde los problemas erosivos son más acuciantes.

De los resultados mostrados también se deduce la clara influencia que los grandes temporales han tenido y tienen en la evolución de este sector. Los temporales de mayor magnitud, especialmente aquellos que han superado los 4 m de altura significativa, han provocado un retroceso perceptible a escala anual. Los procesos de recuperación no llegan a producirse en los lugares con un déficit sedimentario local más elevado. Por el contrario, en aquellos en que el déficit es pequeño sí que existe una recuperación progresiva, aunque esta puede tomar más de un año. La secuencia de varios temporales de alta magnitud, como ha venido sucediendo desde 2017, ha hecho que toda la zona mantenga una tendencia negativa, en ocasiones, como sucede en el extremo meridional, muy marcada.

La tendencia negativa en el extremo meridional –playa del Dosser– ha sido resaltada como uno de los hechos más sorprendentes al afectar a un tramo históricamente acumulativo sustentado en la actuación del promontorio rocoso del cabo de Cullera como trampa sedimentaria natural (Pardo-Pascual et al., 2022). De hecho, el cabo ha sido uno de los puntos de apoyo sobre el que se ha generado la restinga que cierra la albufera (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2019). Es llamativo detectar que hasta 2013 el tramo 32 (playa del Dosser sur) tenía un balance positivo (+14 m respecto a 1984), pero desde entonces ha seguido un retroceso acelerado. En 2017 ya presentaba una tendencia negativa respecto a 1984, y en 2020 mostraba una pérdida de más de 7 m. Ciertamente, en esta evolución reciente ha actuado severamente el impacto de los distintos temporales acaecidos en estas fechas y, especialmente, el temporal Gloria, pero en todo caso es sorprendente reconocer que la playa del Dosser sur es la que más ha perdido en este periodo, más de 21 m cuando la pérdida media entre 2013 y 2020 en el conjunto de la zona estudiada ha sido de 10 m. Esta dinámica tan agresiva de los procesos erosivos en el extremo meridional se podría deber a los efectos de vaciamiento de la parte menos profunda del perfil sumergido de la playa que la serie de grandes temporales, sobre todo del Gloria, ha provocado tanto en la playa como en los fondos sumergidos bajo el cabo de Cullera. Este hecho haría que la arena que llega desde el norte no se acumule en la playa, sino que se esté depositando bajo los fondos del cabo de Cullera. Por otra parte, en las ocasiones en que el oleaje procede del E y el transporte longitudinal va hacia el norte, arrastran arenas a las playas más septentrionales, pero no reciben material del sur por quedar las arenas bajo el cabo a demasiada profundidad. Todo ello explicaría este comportamiento especialmente erosivo entre 2013 y 2020.

Este hecho, a su vez, reafirmaría la evidencia del fuerte déficit sedimentario experimentado por la totalidad del sector estudiado. Este proceso se debería probablemente a la doble confluencia de los efectos provocados por el puerto como barrera al transporte longitudinal junto a la crónica disminución de aportes sedimentarios desde los ríos al sistema litoral. Se podría pensar que este hecho puede estar siendo especialmente virulento por el reciente registro de un gran número de temporales que, además, han sido

los más enérgicos nunca registrados. Esta mayor magnitud y frecuencia de los temporales podría formar parte de una tendencia global relacionada con el cambio climático que, probablemente, se mantendrá o se exacerbará aún más en los próximos años (Schlacher et al., 2008).

De todo lo expuesto se deduce que la sostenibilidad de estas playas puede estar comprometida a medio plazo con las importantes consecuencias negativas que esto puede causar desde una perspectiva tanto ecológica como también social y económica. Las causas fundamentales de este riesgo son de origen antrópico y se relacionan directamente con el menor suministro de sedimentos y su inmovilización.

En este escenario erosivo y de cambio climático, la inacción es una alternativa que conducirá al retroceso de las playas o a su desaparición. Aunque diferentes alternativas, como la retirada planificada, pueden ser adoptadas (Williams et al., 2018), en la costa valenciana la ocupación del territorio costero con una masiva presencia de edificaciones hace sumamente complicada la adopción de este tipo de estrategias. Considerando el valor socioeconómico que presentan las playas del Mediterráneo (Ariza et al., 2012) y de la costa valenciana (Cabezas-Rabadán et al., 2019c), parece razonable proponer el aporte y redistribución de los sedimentos en un volumen suficiente como estrategia para minimizar el riesgo de degradación y pérdida de estas playas y de sus funciones. De los resultados aquí observados hemos de suponer que ello implicaría inicialmente una mejora de las playas del segmento meridional de la zona estudiada y, dependiendo del volumen, es posible que también otras zonas. Es muy importante, en todo caso, que la granulometría del material aportado presente un calibre compatible con el original (Pranzini et al., 2018). El análisis de los efectos de las aportaciones de arena ha permitido observar cómo los vertidos realizados sobre el sistema dunar en lugar de sobre la propia playa aparecen como una medida eficaz útil para nutrir de sedimento al conjunto del sistema.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis sistemático de los cambios registrados en la posición de la línea de costa partiendo de las 923 SDS deducidas con SHOREX de las imágenes capturadas por los satélites Landsat (5,7 8) y Sentinel 2 entre 1984 y 2020. De esta forma, se ha dispuesto de una secuencia extremadamente detallada de los cambios detectados, lo que ha permitido interrelacionarlos tanto con las cambiantes condiciones del oleaje como con las diversas actuaciones humanas habidas en las playas existentes entre el puerto de València y el cabo de Cullera, un segmento costero sedimentariamente interconectado.

El análisis ha demostrado que toda la zona estudiada está sometida a un balance sedimentario negativo desde el inicio del periodo de estudio debido a dos causas principales: (i) la interrupción del transporte longitudinal de sedimentos que históricamente han llegado desde el norte causado por los diques del puerto de València, y (ii) por el menor aporte sedimentario desde los cursos fluviales debido a la regularización antrópica de su régimen hídrico.

Se ha observado, asimismo, que existe una relación entre la construcción del dique de la dársena sur del puerto y el desencadenamiento de una fuerte erosión en el tramo existente entre la Casa Negra y la playa del Saler. La ampliación norte, por el contrario, ha tenido un efecto muy limitado.

Se ha podido comprobar, asimismo, que los vertidos artificiales de arena con que se han nutrido las playas y, sobre todo, las primeras alineaciones dunares aparentemente no han supuesto una ampliación significativa y duradera en las playas en que se han hecho las obras. Sin embargo, sí que han tenido una respuesta positiva deriva abajo, donde las condiciones del perfil de la playa han permitido su retención, lo que ha incrementado la anchura de la playa emergida. Este hecho señala la utilidad a medio plazo de este tipo de actuaciones.

Se ha podido reconocer, asimismo, el elevado impacto que tienen los temporales, especialmente aquellos en que la altura significativa de ola supera los 4 m y que provocan retrocesos en la posición de la orilla de elevada magnitud y durabilidad, siendo especialmente contundentes y con efectos más prolongados en el tiempo en aquellos lugares en que el déficit sedimentario local es más fuerte.

Los resultados aquí expuestos evidencian el enorme interés que la monitorización sistemática de las líneas de costa aprovechando las series de imágenes de los satélites Landsat y Sentinel 2, ya que permiten caracterizar la respuesta de las playas sobre largos segmentos costeros interconectados sedimentariamente y durante un periodo de tiempo que ya es lo suficientemente largo como para evidenciar la persistencia o no de tendencias a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto MONOBESAT (PID2019-111435RB-I00) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, y del contrato Margarita Salas dentro del programa de recualificación del sistema universitario español –Ministerio de Universidades– financiado por la Unión Europea –NextGenerationEU–. Los autores agradecen a la ESA (Agencia Espacial Europea) y al USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) el acceso a las imágenes de satélite, a Puertos del Estado por los datos oceanográficos y a la DGSCM por la información relativa a los movimientos de arena.

Queremos agradecer las observaciones realizadas por los revisores del manuscrito que, sin duda, han hecho que mejore el resultado final.

REFERENCIAS

- Almonacid-Caballer J. (2014). *Obtención de líneas de costa con precisión sub-píxel a partir de imágenes Landsat TM, ETM y OLI*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría: Universitat Politècnica de València, 351 pp. doi:10.4995/Thesis/10251/48462.
- Ariza, E., Ballester, R., Rigall-I-Torrent, R., Saló, A., Roca, E., Villares, M., Jiménez, J. A., & Sardá, R. (2012). On the relationship between quality, users' perception and economic valuation in NW Mediterranean beaches. *Ocean & coastal management*, 63, 55-66 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.04.002>
- Benavent, J. M., Collado, F., Martí, R. M., Quintana, A., Sánchez, A., & Vizcaíno, A. (2004). La restauración de las dunas litorales de la Devesa de l'Albufera de València (p. 65). València: Ajuntament de València.

- Bishop-Taylor, R., Sagar, S., Lymburner, L., Alam, I., & Sixsmith, J. (2019). Sub-pixel waterline extraction: Characterising accuracy and sensitivity to indices and spectra. *Remote Sensing*, *11*(24), 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs11242984>
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019a). Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean). *Science of the Total Environment*, *691*, 216-231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.084>
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019b). Monitorizando la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, *23*, 119-139. <https://doi.org/10.21138/gf.640>
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., & Rodilla, M. (2019c). Detecting problematic beach widths for the recreational function along the Gulf of Valencia (Spain) from Landsat 8 subpixel shorelines. *Applied Geography*, *110*, 102047. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102047>
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., & Palomar-Vázquez, J. (2021). Characterizing the Relationship between the Sediment Grain Size and the Shoreline Variability Defined from Sentinel-2 Derived Shorelines. *Remote Sensing*, *13*(14), 2829. <https://doi.org/10.3390/rs13142829>
- Cobo, R. (2008). Los sedimentos de los embalses españoles. *Ingeniería del agua*, *15*(4), 231-241. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2937>
- Cooper, J. A. G., Masselink, G., Coco, G., Short, A. D., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A.N., Kelley, J. T., Pilkey, O. H., & Jackson, D. W. T. (2020). Sandy beaches can survive sea-level rise. *Nature Climate Change*, *10*(11), 993-995. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00934-2>
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., P., Sutton, & van den Belt, M. (1998). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, *25*, 3-15. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(98\)00020-2](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(98)00020-2)
- European Commission (2009). The Economics of Climate Change Adaptation in EU Coastal Areas. Country overview and assessment. *Policy Research Corporation*, Spain. 15pp. Belgium, Brussels.
- Nanson, R., Bishop-Taylor, R., Sagar, S., & Lymburner, L. (2022). Geomorphic insights into Australia's coastal change using a national dataset derived from the multi-decadal Landsat archive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *265*, 107-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107712>
- Obiol-Menero, E. M. (2003). La regeneración de playas como factor clave del avance del turismo valenciano. *Cuadernos de Geografía*, *73*, 121-146.
- Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., & Fernández-Sarría, A., (2018). Sistema para la extracción masiva de líneas de costa a partir de imágenes de satélite de resolución media para la monitorización costera: SHOREX. En *XVIII Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica* (pp. 36-46). 20-22 Jun., València.

- Pardo-Pascual, J. E. (1991). *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. Tesis doctoral. Generalitat Valenciana, Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports.
- Pardo Pascual, J. E. & Sanjaume, E. (2002). Análisis multiescalar de la evolución costera, Valencia. *Cuadernos de Geografía*, 69(70), 95-126.
- Pardo-Pascual J. E. & Sanjaume E. (2019). Beaches in Valencian Coast. En Morales, J. (eds). *The Spanish Coastal Systems*. Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_10
- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024>
- Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., Palomar-Vázquez, J., & Rodrigo-Aleman, R. (2014). Evaluation of storm impact on sandy beaches of the Gulf of Valencia using Landsat imagery series. *Geomorphology*, 214, 388-401. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.020>
- Pardo-Pascual, J. E., Sánchez-García, E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., Priego de los Santos, E., Fernández-Sarría, A., & Balaguer-Beser, Á. (2018). Assessing the Accuracy of Automatically Extracted Shorelines on Microtidal Beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 10, 326. <https://doi.org/10.3390/rs10020326>
- Pardo-Pascual, J. E., Roca Moya, R., & Segura-Beltrán, F. (2019). Análisis de la evolución de la línea de costa entre Alcossebre y Orpesa a partir de fotografía aérea (1956-2015). *Cuadernos de Geografía*, 102, 39-72. <https://doi.org/10.7203/cguv.102.14511>
- Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., & Palomar-Vázquez, J. (2021). Monitorización de las playas mediante imágenes de satélite: el caso del segmento costero Cullera - Gandia. *Cuadernos de Ordenación del Territorio*, 6(3), 83-99.
- Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2022) Analysis of the morphological changes of the beaches along the segment València - Cullera (E Spain) from satellite-derived shorelines. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 48. <http://doi.org/10.18172/cig.5215>
- Pranzini, E., Anfuso, G., & Muñoz-Perez, J. J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139, 32-35. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.05.001>
- Rosselló, V. M. (1986). L'artificialització del litoral valencià. *Saitabi*, 36, 337-364
- Sánchez-García, E., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., & Gómez-Pujol, L. (2020). An efficient protocol for accurate and massive shoreline definition from mid-resolution satellite imagery. *Coastal Engineering*, 160, 103-732. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103732>
- Sanjaume, E., Rosselló, V. M., Pardo, J. E., Carmona, P., Segura, F., & López García, M.ª J. (1996). Recent coastal changes in the Gulf of Valencia (Spain), Zeiscroft für. *Geomorphologie N.F. Suppl. Gd.*, 102, 95-118.
- Sanjaume, E. & Pardo-Pascual, J. E. (2005). Erosion by human impact on the Valencian coastline (E of Spain). *Journal of Coastal Research*, (August), 76-82.

- Sanjaume, E. & Pardo-Pascual, J. E. (2011). Las dunas de la Devesa del Saler. En *Las dunas en España* (pp. 263-283). Sociedad Española de Geomorfología.
- Sanjaume, E. & Pardo-Pascual, J. E. (2019). Littoral Dunes on Valencia Coast. En *The Spanish Coastal Systems* (pp. 631-659). Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_27
- Schlacher, T. A., Schoeman, D. S., Dugan, J., Lastra, M., Jones, A., Scapini, F., & McLachlan, A. (2008). Sandy beach ecosystems: key features, sampling issues, management challenges and climate change impacts. *Marine ecology*, 29, 70-90. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2007.00204.x>
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: a Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature climate change*, 10(3), 260-263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>
- Williams, A. T., Rangel-Buitrago, N., Pranzini, E., & Anfuso, G. (2018). The management of coastal erosion. *Ocean & coastal management*, 156, 4-20. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022>

Cómo citar este artículo:

Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Cabezas-Rabadán, C. (2022). Estudio de los cambios de posición de la línea de costa en las playas del segmento València-Cullera (1984-2020) a partir de imágenes de satélite de resolución media de libre acceso. *Cuadernos de Geografía*, 108-109 (1), 79-104.

<https://doi.org/10.7203/CGUV.108.23828>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.