

MONITORIZACIÓN DE LAS PLAYAS MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE: EL CASO DEL SEGMENTO COSTERO CULLERA – GANDIA

Dr. Josep E. Pardo-Pascual,

Dr en. Geografía, Catedrático de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Tedetección, Universitat Politècnica de València, jepardo@cgf.upv.es

Dr. Carlos Cabezas-Rabadán,

Dr. en Ingeniería Geomática, Graduado en Ciencias Ambientales, Investigador del Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Tedetección, Universitat Politècnica de València, carcara4@upv.es

Dr. Jesús M. Palomar-Vázquez,

Dr Ingeniero en Cartografía y Geodesia, Profesor Titular de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Tedetección, Universitat Politècnica de València, jpalomav@upvnet.upv.es

RESUMEN

Las playas son espacios naturales de gran importancia socioambiental amenazados por procesos erosivos. Los satélites Landsat 8 y Sentinel 2 ofrecen gran potencial para la monitorización costera. Sus imágenes, gratuitas, permiten extraer de forma automática información cuantitativa de la morfología de las playas como es la posición de la línea de costa con una gran frecuencia temporal (cada 2-5 días) y cubriendo grandes territorios. La recopilación de grandes paquetes de líneas permite cuantificar la anchura de playa y sus cambios a lo largo del espacio y del tiempo.

La aplicación de esta metodología sobre el sector Cullera – Gandia ha permitido analizar el estado actual y la tendencia seguida por las playas, su relación con las condiciones de oleaje, y evaluar el impacto de actuaciones de realimentación. Los resultados muestran una clara tendencia erosiva generalizada, probablemente asociada a la falta de sedimento en el sistema, con la mayoría de tramos incapaces de recuperarse de los retrocesos causados por los temporales. Asimismo, evidencian la ineficacia de las acciones de vertido, al menos en la forma en que se han llevado a término, y la necesidad acuciente de una estrategia para hacer frente al problema erosivo. Esta toma de decisiones debe ir irremediablemente sustentada en una caracterización y monitorización del conjunto de las playas que permita comprender su funcionamiento, identificar las causas de la erosión, y proponer medidas orientadas hacia el mantenimiento físico de las playas o, en su defecto, la menor afección posible a las sociedades costeras.

Temática clave: erosión costera, monitorización de playas, extracción de líneas de costa, realimentaciones de arena, dinámica de playas, temporales costeros

INTRODUCCIÓN

Las playas pueden ser entendidas como uno de los principales recursos naturales del territorio valenciano. Tradicionalmente se ha considerado que presentan tres funciones básicas, todas

ellas extremadamente valiosas para la sociedad (Cabezas-Rabadán et al., 2019a). La primera es que las playas constituyen por sí mismas una forma del terreno sumamente singular que sustenta ecosistemas únicos. Ello es debido a su posición geográfica fronteriza entre el mar

y la tierra, a su composición —formada por sedimentos sueltos con una elevada permeabilidad— y sobre todo por su extraordinario dinamismo que provoca continuos cambios en su forma. La segunda función es que actúan como sistema de defensa de la costa frente a los envites del oleaje durante los temporales costeros. Al estar constituidas por sedimentos sueltos éstos readaptan la morfología de la playa a las condiciones de la energía incidente (cambios de anchura y pendiente, formación y desplazamiento de barras submarinas, etc.). Esta adaptabilidad facilita la disipación de la energía y la resiliencia de las playas, haciendo que se erijan como un sistema defensivo de los territorios costeros extremadamente eficiente. La tercera función viene asociada a su uso recreativo, ya que las playas constituyen uno de los espacios naturales más apreciados por las sociedades costeras como área de disfrute y descanso. Esta condición de lugar de esparcimiento tiene un carácter universal, pero en playas como las mediterráneas en las que además la temperatura del agua es cálida durante los meses estivales, esta función es todavía más evidente. Todo ello favorece que millones de personas busquen estos ambientes para disfrutar de su tiempo de vacaciones, lo que las convierte en un recurso clave de la industria turística. Esta función recreativa tiene por tanto unas derivadas sociales y económicas de primera magnitud haciendo que la ciudadanía, empresas, organismos y administraciones reconozcan el gran valor social y económico que poseen las playas.

Todo ello nos hace entender que la posibilidad de pérdida o degradación de estos entornos provoque una fuerte preocupación en los ciudadanos y en las partes interesadas en la explotación de las playas, que suelen demandar soluciones rápidas para salvaguardar este bien. Por tanto, conocer el estado de las playas y el riesgo real de pérdida o degradación que presentan, tiene un interés estratégico y es imprescindible para decidir adecuadamente la conveniencia o no de actuar en una zona parti-

cular y el modo de hacerlo. El interés en conocer el estado de las playas de forma actualizada se entiende como perentorio si además de lo ya expuesto se toma en consideración el incremento progresivo del riesgo de desaparición como consecuencia de la subida del nivel del mar y del aumento de la frecuencia y energía de los eventos de temporal altamente energéticos que vienen como corolarios del calentamiento atmosférico global.

Los cambios morfológicos que se producen continuamente en las playas tienen diferentes dimensiones, sentidos y causas. Algunos siguen una dinámica cíclica —como son muchas de las variaciones estacionales— mientras que otros la tienen progresiva, es decir, que una vez se ha producido una alteración en la forma, ésta perdura por largo tiempo. Resulta pues esencial comprender cada uno de los múltiples procesos que interactúan en las playas a distintas escalas —espaciales y temporales— para lograr tener un diagnóstico correcto del estado de las mismas. Por ello, buena parte de los esfuerzos investigadores han ido orientados a modelizar los distintos procesos que en ellas interactúan. Dichos modelos —en tanto que sean capaces de describir adecuadamente los distintos mecanismos físicos que se suceden en estos ambientes— se transforman en herramientas clave para prever la respuesta frente a los agentes que actualmente actúan sobre la costa, y también frente a los que se prevé que actuarán con las alteraciones futuras asociadas al cambio climático. Evaluar la corrección de estos modelos no es siempre tarea sencilla y requiere de un contraste sistemático con los cambios reales que se van produciendo. La medición sistemática de los cambios, sobre todo si se realizan sobre áreas variadas y en momentos diferentes aporta un sistema de contraste frente a los modelos, al tiempo que aporta una base informativa real útil en sí misma. Es por ello que la monitorización sistemática de las playas es también una estrategia útil para entender cómo y por qué cambian las playas, per-

mitiendo así conseguir un correcto diagnóstico de su estado. Los sistemas de monitorización raramente son capaces de registrar todos y cada uno de los cambios que realmente se producen en una playa debido a que éstos tienen lugar a lo largo de todo el perfil móvil de playa (que incluye tanto la parte emergida como la sumergida) y en todos los momentos. En realidad, la monitorización ha de conseguir realizar una buena aproximación a los principales cambios que realmente se producen.

Una de las formas tradicionales de monitorizar la dinámica evolutiva de las playas ha sido analizar los cambios en la línea de costa registrado a lo largo de series sucesivas de fotografías aéreas. Este método se ha demostrado útil para detectar las alteraciones morfológicas de mayor dimensión (Stafford, 1971; MOPU, 1979; Pardo-Pascual, 1991; Pardo-Pascual et al., 2019) sobre todo en entornos como las costas mediterráneas en las que el rango mareal es muy pequeño. El uso de las fotografías aéreas como fuente de información presenta limitaciones claras debido a la escasa frecuencia en los registros, lo que impide reconocer la magnitud y sentido de los cambios de carácter oscilatorio que se producen en lapsos temporales cortos (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2001).

Desde hace algunos años se ha planteado la posibilidad de usar como fuente de información las sucesivas imágenes multiespectrales adquiridas desde satélites artificiales, sobre todo aquellas tomadas con una resolución media (10-30 m de pixel). Éstas presentan como principales ventajas el registro sistemático con una alta frecuencia temporal (cada 2 - 5 días cuando se integran imágenes de distintos satélites), la cobertura total del planeta desde mediados de los años ochenta del siglo pasado, y el hecho que desde 2008 se puede disponer de ellas de forma gratuita. Hablamos, fundamentalmente, de dos series de imágenes de satélite: las Landsat adquiridas por la NASA y gestionadas por el United States Geological Survey (USGS)

y las Sentinel 2 adquiridas y gestionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA). La disponibilidad gratuita de las imágenes va acompañada de un tratamiento homogéneo y normalizado de estas imágenes y del desarrollo de servidores que facilitan la descarga sistemática de las mismas. Todo ello favorece la posibilidad de crear herramientas informáticas que permitan automatizar buena parte de los procesos de gestión de las mismas. Su limitación esencial a la hora de delimitar la línea de costa procede, sin duda, de la resolución espacial de estas imágenes: 30 m en el caso de las imágenes multiespectrales Landsat, y 10 ó 20 m en el caso de las Sentinel 2.

Para resolver esta limitación se han propuesto recientemente distintas soluciones algorítmicas (Pardo-Pascual et al., 2012; 2018; Almonacid, 2014; Vos et al., 2019; Bishop-Taylor et al., 2019, Sánchez-García et al., 2019, 2020) que tratan de deducir la posición de la línea de costa con una precisión subpixel (mejor al tamaño del pixel) con lo que se resuelve buena parte de esta dificultad. Todo ello hace que se disponga de una inmensa base documental que arranca en 1984 con las imágenes del Landsat 5 y que llega a la actualidad, y con toda seguridad proseguirá en los próximos años. Esa base documental tiene como valor añadido su elevada homogeneidad, lo que permite desarrollar procesos de análisis sistemáticos y automatizados, y de los que se pueden obtener unos resultados —las líneas de costa o SDS (*satellite derived shoreline*)— con unos niveles de precisión sumamente elevados y homogéneos.

En el presente estudio se pretende evaluar las potencialidades que tiene el empleo de líneas de costa derivadas de imágenes de satélite (SDS) para monitorizar la evolución morfológica de las playas a lo largo de un segmento costero valenciano, concretamente el existente entre el sur del término municipal de Cullera y el puerto de Gandia a distinta escalas temporales y espaciales. Se trata de monitorizar

los cambios en tramos insertos dentro de una misma célula sedimentaria costera, pero con condiciones evolutivas radicalmente distintas ya que se incluyen tanto zonas muy erosivas como otras que han seguido una tendencia claramente acumulativa. El objetivo es reconocer la capacidad de detectar y caracterizar los cambios causados a corto y medio plazo tanto por la dinámica natural (condiciones del oleaje) como por las acciones humanas como son los vertidos y extracciones de sedimentos realizadas dentro de la zona de estudio, de manera que se pueda establecer un diagnóstico riguroso y fiable de su estado.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se centra en los 14,5 km de playas existentes entre la playa del Brosquil, en el extremo meridional del término municipal de Cullera y la playa norte de Gandia (Figura 1). Son playas todas ellas arenosas en las que en su zona septentrional dominan las texturas más groseras $-D_{50} = 59 \text{ mm}-$ mientras que en las playas apoyadas en el dique norte de Gandia los materiales son sustancialmente más finos $-D_{50} = 0.18 \text{ mm}-$ (Cabezas-Rabadán, et al, 2021).

Se trata de una costa micromareal (la máxima oscilación astronómica es de 0,39 cm, pero añadiendo la meteorológica puede superar los 1,32 m) y con condiciones de oleaje de escasa energía de modo que solo el 24% de las olas presenta una altura significativa superior a 1,5 m (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2018). Los oleajes más frecuentes y de mayor energía proceden del ENE (Figura 2) lo que provoca, dada la orientación general de la costa (Figura 1) que el transporte longitudinal dominante sea hacia el sur.

Este segmento costero aparece inserto dentro de una misma célula sedimentaria que históricamente y de forma natural había seguido una tendencia claramente acumulativa como

demuestra tanto el desarrollo de una doble restinga holocena (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2003) como la posición tan tierra adentro

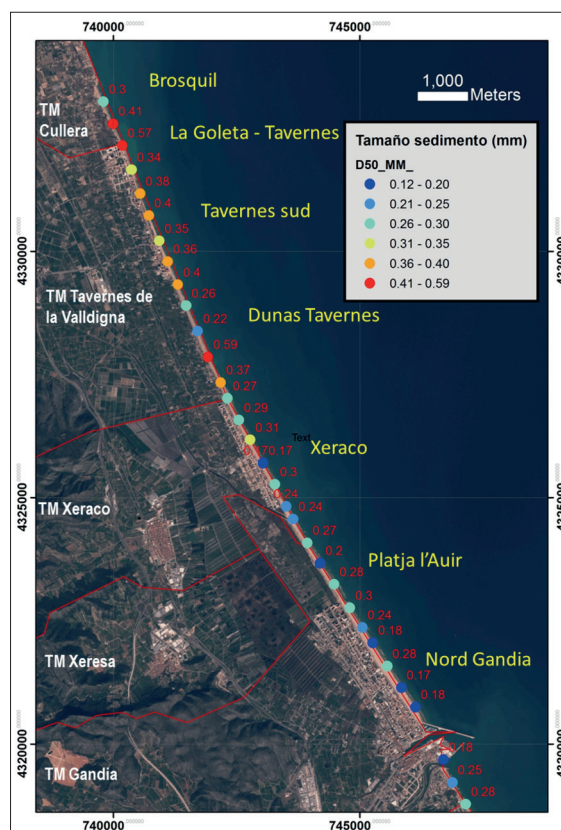


Figura 1. Textura de las arenas de las playas analizadas en la zona de estudio. Los datos originales utilizados para crear este mapa se han obtenido de: <http://www.mapama.gob.es/es/costas/temas/proteccioncosta/ecocartografias/default.aspx>

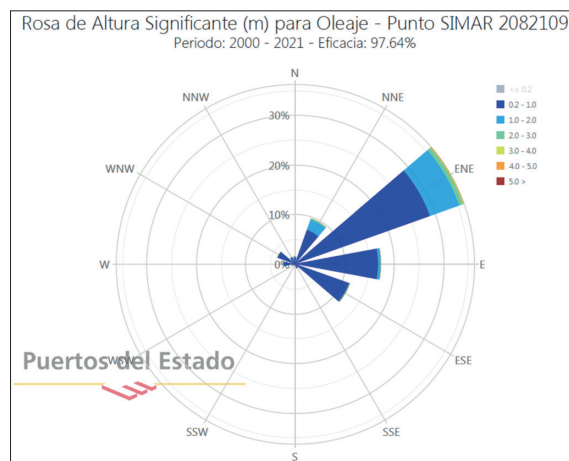


Figura 2. Diagrama de la dirección media anual de las olas según su altura significativa. Tomado de: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>

en que encuentra las torres vigía del siglo XVI contra los piratas (Pardo-Pascual, 1991). Otra prueba del comportamiento acumulativo es el desarrollo de uno o varios cordones dunares bien desarrollados que todavía hoy permanecen al sur del término de Tavernes, en Xeraco, y también en la playa de l'Auir de Gandia. En el resto de las zonas también existió, pero tanto el aprovechamiento agrícola tradicional como la introducción de edificaciones junto a la playa lo han hecho desaparecer (Sanjaume y Pardo Pascual, 2018). Asimismo, en la zona de Tavernes y del Gandia son los edificios los que han hecho desaparecer no solo las dunas interiores, sino también el primer cordón. En el caso de Xeraco dicho cordón ha sido respetado parcialmente.

Esta tendencia acumulativa general en la zona ha quedado fuertemente alterada por distintas acciones humanas durante los últimos 150 años debido sobre todo a la introducción de infraestructuras que interrumpen el transporte longitudinal de sedimentos causando un fuerte déficit sedimentario en algunos sectores mientras que en otros provocan un fuerte superávit (Cabezas-Rabadán et al., 2019b). Nos referimos particularmente a la construcción del puerto de Gandia (1892) y de los diques de encauzamiento de la desembocadura del río Xúquer (a principios de los años 50 del siglo XX) que han supuesto una alteración radical del

comportamiento evolutivo de la zona. Pocos años después de la construcción de los diques se evidenció la existencia de procesos erosivos al sur de los mismos sumamente agresivos que se trataron de paliar mediante la construcción de distintas obras de defensa. En vez de resolver el problema, estas actuaciones migraron el problema erosivo hacia el sur forzando a la creación de nuevas obras que a su vez provocaban el mismo efecto (Pardo-Pascual, 1991; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2018).

El límite norte de nuestra zona de estudio se fija pues en la playa del Brosquil de Cullera, allí donde se acaban las estructuras de defensa y donde comienza la playa. Es una zona que en las últimas décadas –sobre todo a partir de la década de los ochenta del siglo pasado– ha tenido un comportamiento muy erosivo, que se ha tratado de resolver mediante el aporte artificial de arena (Figura 3). Según los registros de la Demarcación de Costas de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar (DGSCM), entre 1988 y enero de 2020 813.480 m³ de arena han sido aportados al sector erosivo de las playas del Brosquil y de la Goleta de Tavernes de la Valldigna.

Este comportamiento fuertemente erosivo contrasta con lo que sucede en el límite sur de la zona de estudio. Los diques del puerto de

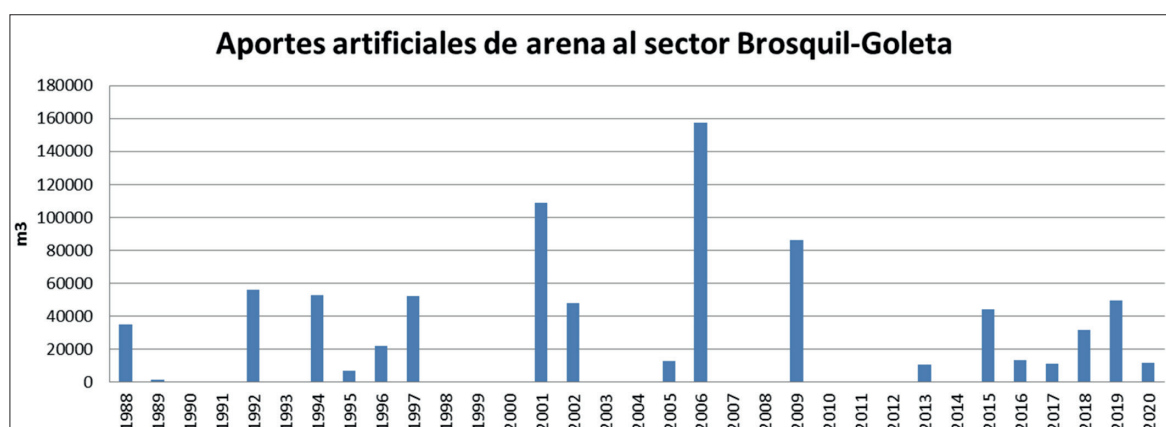


Figura 3. Volumen de arena (m³) aportado artificialmente en las playas del Brosquil (Cullera) y de la Goleta (Tavernes de la Valldigna) en el periodo 1988 – enero de 2020. Datos aportados por la Demarcación de Costas de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar.

Gandia han actuado como una trampa sedimentaria y ello ha ido provocando una progresiva ampliación de la playa de Gandia Nord. Si comparamos las fotografías aéreas de 1956 y de 2020 podemos observar que la playa ha ganado unos 75 m de anchura.

Así pues, la zona queda caracterizada desde la perspectiva de su evolución reciente con un tramo claramente erosivo al norte, asociado sobre todo a la interrupción del transporte longitudinal que causan los diques de la desembocadura del río Xúquer y las obras de defensa que hay inmediatamente al sur, y una zona claramente acumulativa al sur, causada asimismo por la detención de esa deriva litoral causada por el puerto de Gandia.

MÉTODO

El diagrama de flujo expuesto en la Figura 4 resume básicamente la metodología que se sigue

en este estudio. Por una parte, se utilizan todas las imágenes disponibles de la serie Landsat 8 y Sentinel 2 disponibles entre 2013 y noviembre de 2020 para definir automáticamente las líneas de costa (SDS) empleando el sistema de extracción SHOREX. Con ellas se construye un modelo continuo espacio-temporal que mide tanto la anchura media de la playa, como sus cambios de anchura, y que constituye la herramienta básica que se utilizará para caracterizar los cambios. Por otra parte, se toman los datos de las condiciones del oleaje (altura significativa y periodo de pico) con las que se estudiará cómo afectan las variaciones de energía del oleaje a las playas. Por último, se analiza la serie de datos de aportes o extracciones artificiales de sedimentos de las playas. Dichas actuaciones antrópicas presentan diferentes dimensiones y se producen en lugares y momentos distintos. Su impacto sobre las playas se analizará comparándolo con las variaciones registradas en los modelos espacio-temporales de cambios de anchura de playa.

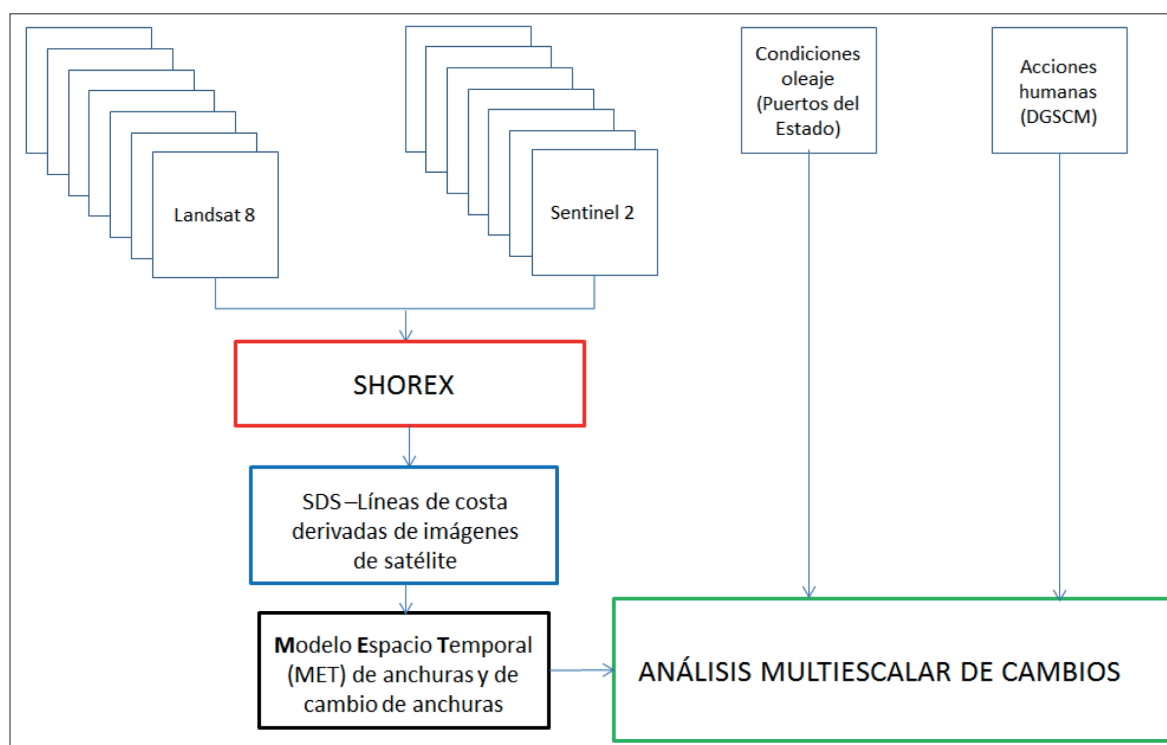


Figura 4. Diagrama de flujo que indica la metodología seguida en este trabajo.

Imágenes y documentación utilizada

La principal fuente de información ha sido la serie de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2. Son imágenes multispectrales que capturan la señal en distintas bandas del espectro óptico incluyendo varias fracciones de infrarrojo cercano y medio. Dichas bandas infrarrojas permiten diferenciar con mucha claridad el agua del resto de los elementos superficiales, permitiendo que la orilla quede claramente delimitada. Obviamente, para que las imágenes sean útiles éstas han de estar libres de nubes. Esto implica que, aunque el satélite adquiera de forma sistemática imágenes de un mismo lugar, las imágenes no siempre son útiles, provocando que haya periodos relativamente largos sin datos disponibles. Por otra parte, en ocasiones durante el registro de la imagen algunas partes de la zona de estudio presentan nubes y otras no, causando que el número de datos no sea exactamente el mismo para toda la zona de estudio. Con todo, el número total de SDS obtenido ha oscilado entre 217 y 220.

Es importante resaltar que el número de imágenes disponibles ha ido aumentando de forma muy sustancial con el paso de los años (Figura 5). Así, entre 2013 y 2015 solo se disponen de imágenes Landsat 8, pero a partir de julio de

2015 se añaden las imágenes del primer satélite Sentinel 2 al que se suma un segundo a partir de marzo de 2017.

Además de las imágenes el presente trabajo también ha empleado datos de oleaje. En concreto se han usado los registros de la página de Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>) del punto SIMAR 2082109 situado frente a las playas de Xeraco. Así, se han analizado los datos horarios de altura significativa de ola, periodo de pico y dirección del oleaje.

Por otra parte, se ha contado con una base de datos de las distintas acciones de recuperación de las playas gestionadas desde la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar en la provincia de Valencia (DGSCM) desde la década de los ochenta a principios de 2020. En ella se explicita el tipo de acción (vertido o extracción de arena), el volumen desplazado, el lugar aproximado y la fecha de inicio y fin de cada acción.

Extracción de las líneas de costa deducidas de las imágenes

Las bandas espectrales que interesan para la detección de la posición de la costa –límite

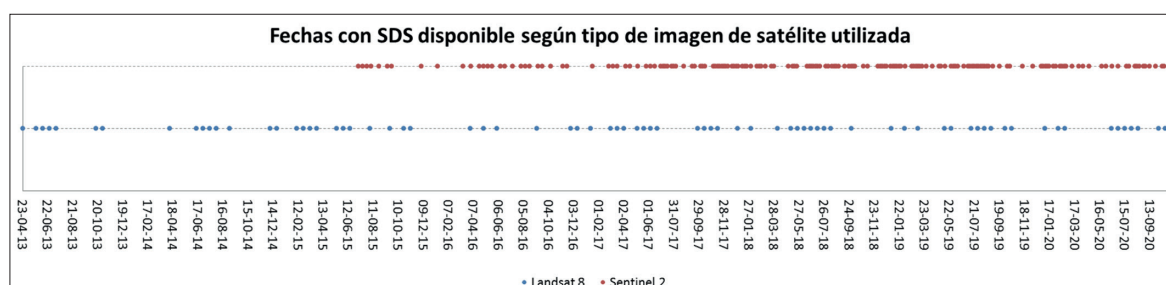


Figura 5. Imágenes útiles para la extracción de la línea de costa (SDS) a lo largo del tiempo según los diferentes sensores

1. Si se desea conocer con más detalle qué son las imágenes Landsat 8 se puede consultar https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con (visitada el 22 septiembre de 2021).

2. Si se desea conocer con más detalle qué son las imágenes Sentinel 2 se puede consultar <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (visitada el 22 septiembre de 2021).

agua/no agua—son las correspondientes al infrarrojo próximo y medio, que en el caso del Sentinel 2 tienen una resolución espacial de 10 o 20 m (dependiendo de la banda espectral) y en el caso del Landsat 8, de 30 m, lo que supone una resolución excesivamente grosera para detectar los cambios en la costa. Sin embargo, el grupo CGAT-UPV (<http://cgat.webs.upv.es/>) ha desarrollado distintas metodologías y herramientas para aprovechar este tipo de imágenes de forma eficiente y determinar la posición de la orilla con una precisión sustancialmente mejor a la resolución ofrecida por las imágenes utilizadas. Los fundamentos de estos métodos están descritos en Pardo-Pascual et al. (2012), Almonacid-Caballer (2014), Pardo-Pascual et al. (2018), Sánchez-García, (2019), Sánchez-García et al, (2020). Además de soluciones algorítmicas nuestro equipo ha desarrollado el sistema de extracción líneas de costa SHOREX que permite la obtención de las SDS de forma prácticamente automática (descrito en detalle en Palomar-Vázquez et al., 2018 y en Cabezas-Rabadán et al., 2021).

nivel de precisión con que se obtienen las SDS. A lo largo de estos años se han realizado evaluaciones en distintos lugares con procedimientos progresivamente mejorados con los que se han ido obteniendo precisiones cada vez mejores. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los distintos estudios llevados a cabo y ya publicados.

Como se puede observar en la tabla, los mejores resultados son los que se han medido sobre 91 posiciones distintas de la línea de costa en Cala Millor (Mallorca) con Sentinel 2 que establecen la exactitud en la posición de la orilla con un error medio cuadrático de 3,01 m y de 3,57 m cuando se emplean imágenes Landsat 8. Estos valores son coherentes con nuevas pruebas que actualmente se están llevando a cabo en otros entornos micromareales, por lo que son las precisiones asimilables a las SDS analizadas en este trabajo.

Obtención de los modelos espacio-temporales (MET) de anchura y cambio de anchura de playa

Una cuestión clave a la hora de aprovechar estas imágenes para estos fines es establecer el

Una vez se dispone de todas las SDS hay que realizar un análisis que permita reconocer la

Tabla 1. Resumen de las evaluaciones de la extracción de la línea de costa desde el diseño del algoritmo base realizadas con distintas condiciones de marea y oleaje. La precisión aparece en las tres últimas filas para los diferentes satélites Sentinel y Landsat, expresada como error medio cuadrático (m).

	Pardo-Pascual et al., 2012	Pardo-Pascual et al., 2018	Palomar-Vázquez et al., 2019	Sánchez-García et al., 2019	Sánchez-García et al., 2020	Cabezas - Rabadán et al., 2020
Lugar	Borriana (Castelló, España)	El Saler (Valencia, España)	Gallocanta (Aragón, España)	Reñaca (Central Chile)	Cala Millor (Mallorca, España)	Faro (Algarve, Portugal)
Tipo costa	Escollera	Playa arenosa	Lago somero	Playa arenosa	Playa arenosa	Playa arenosa expuesta
Marea	Micro	Micro	Inexistente	Micro	Micro	Meso
Software	SELI	SELI	SHOREX	SHOREX	SHOREX	SHOREX
Nº de SDS	45	21	1	7	91	24
Referencia	Fotointerp.	Fotogram.	GNSS alongshore	Fotogram.	Fotogram.	GNSS cross-shore
Adquisición	Ortofotos	Simultánea	Simultánea	Simultánea	Simultánea	Fechas cercanas
S2	---	6.6	4.15	4.55	3.01	4.58
L8	---	6.6	---	---	3.57	5.77
L5, L7	5 aprox.	7.4 - 8.0	---	---	---	---

evolución recogida por ese amplio paquete de datos. Para ello se propone la creación de dos tipos de modelos espacio-temporales (MET): (1) de anchura de playa, y (2) de cambio de anchura de playa. Para el primer modelo se realiza una división longitudinal en unidades analíticas de playa (en este caso segmentos de 60 m de longitud) donde se obtiene y se registra la anchura media en cada fecha para cada segmento interpolando posteriormente los datos para el resto de posiciones espaciales inmediatas. Para el segundo de los modelos se parte de la anchura media de playa antes calculada y se obtiene el cambio de anchura de cada fecha respecto a la fecha inicial de toda la serie (en nuestro caso el 23/04/2013). De esta forma lo que vemos es cómo va cambiando cada sector respecto a su posición original. Toda esta información se dispone sobre un gráfico Hövmoller donde la magnitud del cambio, simbolizada con un código de colores, se muestra sobre un sistema cartesiano de forma que el eje vertical define la posición geográfica y el eje horizontal el tiempo. En el trabajo de Cabezas-Rabadán et al., (2019c) se puede encontrar una descripción detallada de esta metodología. De forma muy resumida sería tal y como sigue:

- SHOREX obtiene la SDS de cada imagen como una serie de puntos separados 5 m entre ellos. Para definir las anchuras se propone medir la distancia desde cada uno de esos puntos respecto al límite interior de la playa (en este caso definido mediante una línea fotointerpretada). Esa línea está dividida en segmentos de 60 m de longitud en los que para cada fecha se promedia la distancia a todos los puntos asociados a ese segmento de cada SDS. Esto da lugar a la anchura media de cada fragmento de playa cada uno de los días analizados (Figura 6).
- Una vez se dispone de cada valor de anchura media por segmento y fecha, esta información se organiza espacialmen-

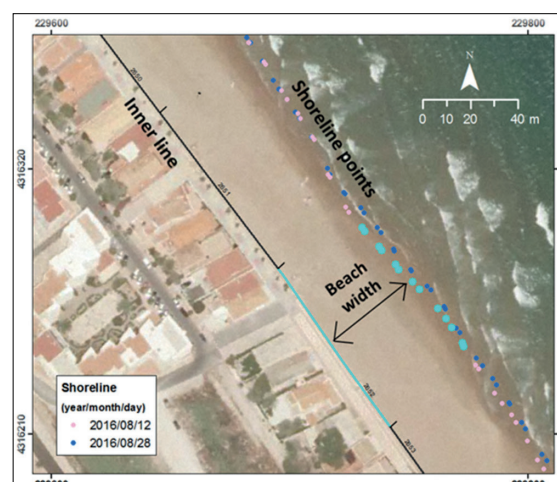


Figura 6. Forma de medir la anchura media de cada segmento.

te en dos ejes (vertical para el espacio y horizontal para el tiempo) obteniendo una malla de puntos uniformemente espaciados. Es importante que ambos ejes presenten una escala adecuada y coherente para una correcta representación visual de la información. Para cubrir los espacios vacíos entre los puntos y obtener una superficie continua, se interpola la información mediante un sistema de triangulación (conversión de la malla de puntos a una malla de triángulos irregulares -TIN). El modelo obtenido finalmente se rasteriza (se convierte a imagen) para que su análisis resulte más eficiente (Figura 7).

Estos modelos son un resultado en sí mismo, pero al mismo tiempo pueden utilizarse para hacer análisis posteriores como cuantificar a lo largo del tiempo las variaciones medias de tramos más largos –por ejemplo, unidades de playa así definidas para su gestión- y su comparación con las condiciones del oleaje.

RESULTADOS

En la Figura 8 se muestran los MET de anchura y de cambio de anchura respecto a la primera fecha estudiada (23 abril de 2013). En la figura

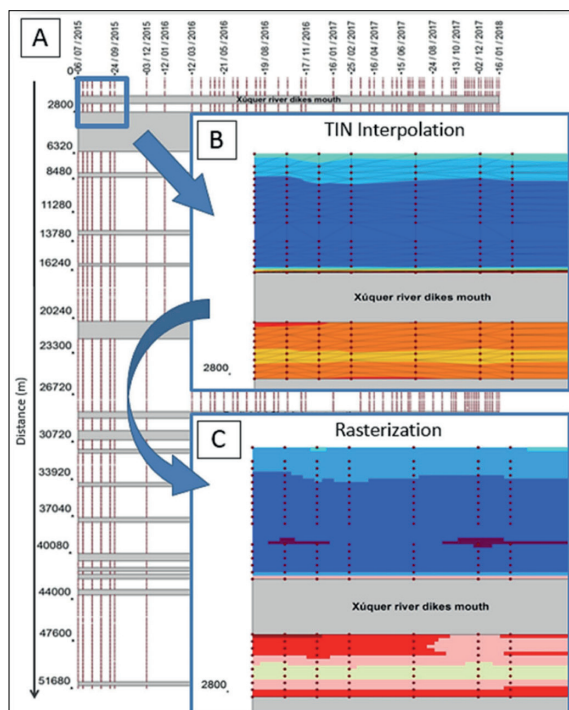


Figura 7. Proceso de creación del gráfico Hövmoeller (modelo espacio-temporal) a partir de los datos de anchura o de cambio de anchura: a) distribución de la malla de puntos; b) triangulación; c) rasterización.

se presenta también un gráfico –escalado de forma que se pueda comparar con el resto de modelos- de la evolución de la altura significativa de ola (Hs) en metros.

De estos MET se pueden ir deduciendo múltiples conclusiones. En la Figura 9 se expresa la evolución media del sector (Figura 9a) y también la proporción de segmentos de playa que a lo largo de cada uno de los años ha tenido una anchura de playa igual o inferior a 30 m, que sería la anchura a partir de la cual puede comenzar a considerarse como problemática (Cabezas-Rabadán et al., 2019a). El gráfico 9a plasma la tendencia predominantemente erosiva que sigue la zona, sobre todo a partir de 2017, marcando un retroceso medio muy llamativo en 2020. El gráfico 9b tiene una lógica similar, si bien aquí se aprecia que el aumento de segmentos con anchura inferior a 30 m ha sido creciente no habiendo ningún momento en que fuera menor al registrado en 2013. Esto parece señalar que, si bien en 2016 hubo un aumento de la anchura que sugiere un estado

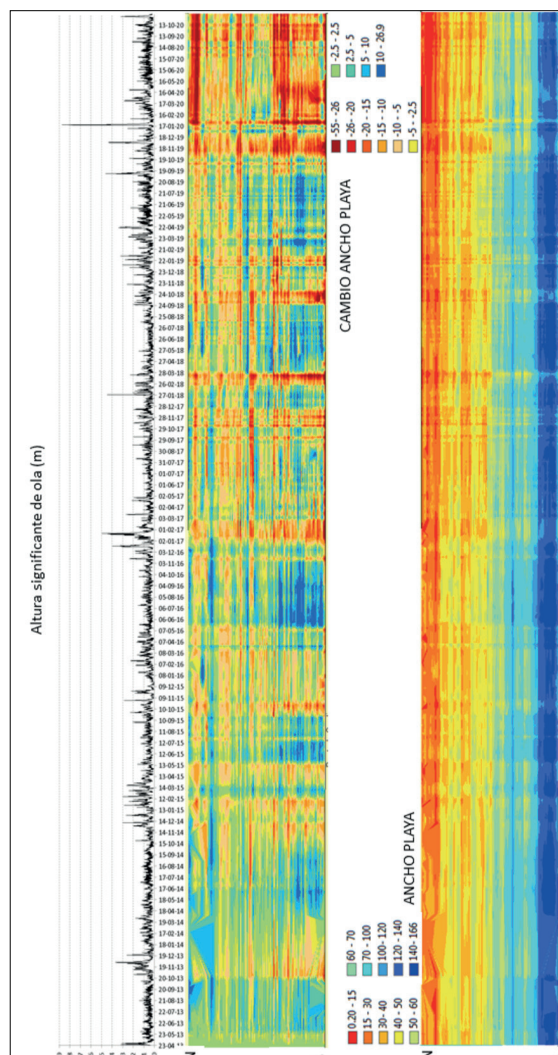


Figura 8. MET de la zona de estudio y condiciones del oleaje a lo largo de periodo estudiado

mejor que el de 2013, la proporción de segmentos con anchuras problemáticas era claramente mayor a la situación de 2013, lo que remarca que la mejora era solamente parcial y en localizaciones puntuales. En ambas gráficas el impacto de los temporales de 2017 y sobre todo de 2020 es evidente y claramente negativo.

Tomando en consideración toda la serie de registros se ha calculado la tasa de cambio registrada en el periodo analizado. Dicha tasa de cambio –expresada en m/año- ha sido deducida mediante un ajuste lineal de las anchuras de la playa en cada segmento analizado respecto a su fecha. En la Figura 10 se

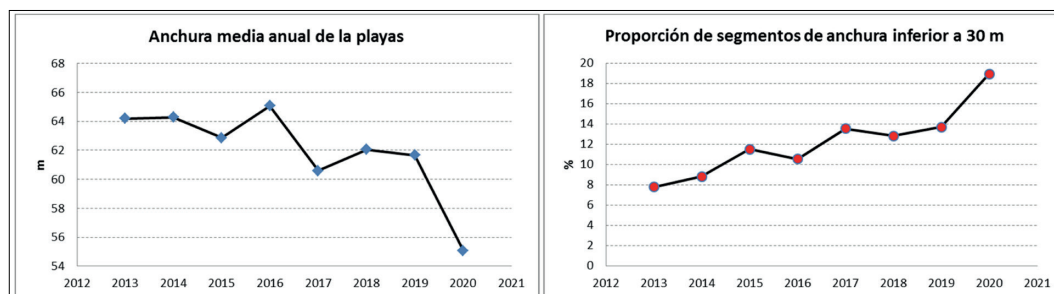


Figura 9. Variaciones morfológicas del conjunto de la zona estudiada promediando anualmente los valores. El gráfico A muestra la anchura media del conjunto de todas las playas por cada uno de los años. El gráfico B muestra la proporción de playas con anchura igual o inferior a 30 m (es decir, el umbral de anchura que se considera problemático) en cada uno de los años estudiados

muestra un mapa de la zona en la que se han representado mediante un código de colores las magnitudes y el sentido de los cambios. En una gradación de tonos rojos a amarillos se señalan los lugares con tendencia erosiva, mientras que en tonos azules se representan las situaciones de acumulación. En verde se señalan los lugares con comportamiento estable.

Esta manera de representar la información aventaja a los MET (Figura 8) en la medida en que se dispone de una base cartográfica que ayuda a reconocer el comportamiento en cada segmento analizado. Sin embargo, es obvio que el dato es mucho más simple y puede estar excesivamente influenciado por las anchuras iniciales y finales de la serie.

Llama la atención que el comportamiento registrado ha sido negativo prácticamente en toda la zona de estudio. Es también destacable que las mayores tasas de pérdidas no se producen solo en el Brosquil y la Goleta –como sería de esperar- sino también en zonas teóricamente estables o acumulativas como las dunas del sur de Tavernes de la Valldigna o en las playas de Xeraco y l'Auir.

Para facilitar la interpretación evolutiva se ha resumido la evolución seguida, año a año, en los 30 sectores diferenciados (numerados de norte a sur), cuyo resultado se muestra en la Figura 11. En ella se muestra con un código de colores la diferencia de la anchura media

anual de cada año respecto a la anchura media anual de 2013. Se reconoce que excepto en tres sectores la tendencia del 2020 es claramente negativa en la zona de estudio, con pérdidas mayores a 10 m en trece de los sectores,

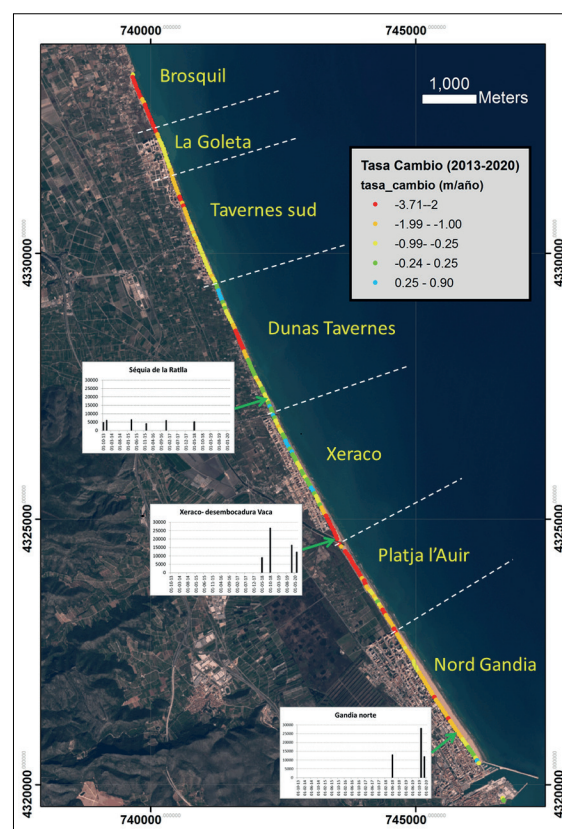


Figura 10. Mapa de tasa de cambio (m/año) en el periodo 2013-2020 tomando en consideración todos los registros analizados. Se indican los límites de los siete sectores geográficos diferenciados según su dinámica evolutiva. También se muestran gráficos de las extracciones de arena (expresadas en m³) en las distintas fechas y lugares en que se han realizado durante el periodo analizado

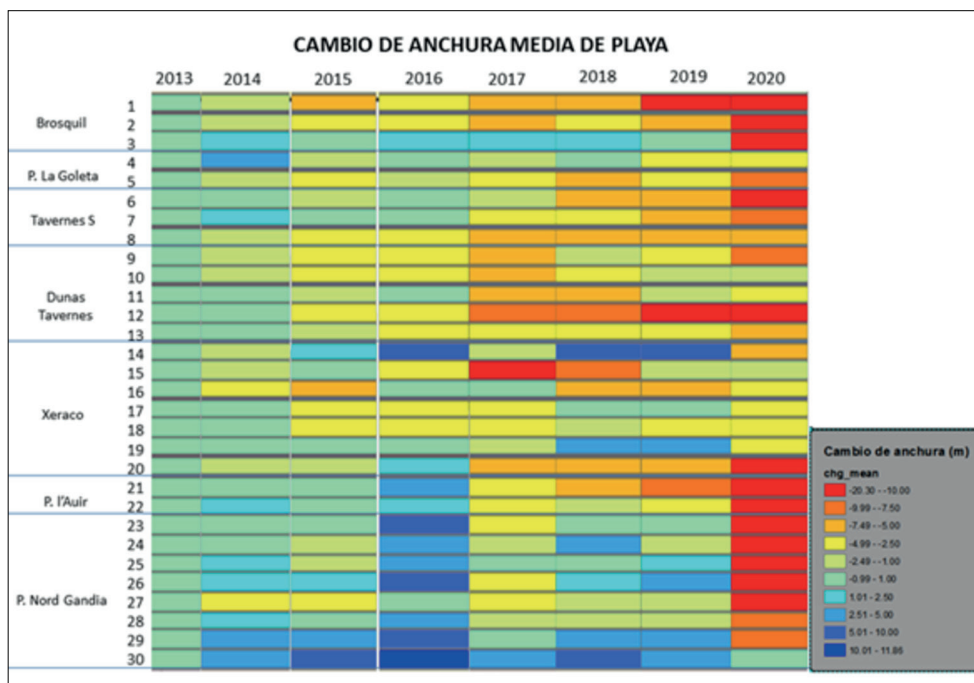


Figura 11. Resumen evolutivo de la variación media anual para los 30 sectores en que se divide de norte a sur la zona de estudio.

incluyendo buena parte de la playa norte de Gandia. También se puede apreciar que, tras el retroceso de 2017, la zona del sur de Tavernes no se recupera en ningún caso. Y ello también se aprecia en algunos sectores del tramo de las dunas de Tavernes. El año 2016 sí señala un avance claro en las playas del norte de Gandia y l'Auir y en algunos sectores más, pero ya desconectados entre sí (Brosquil y Xeraco). El 2017 es de pérdida en todos los sectores excepto en el sur del Brosquil.

Puede llamar la atención que en la playa de l'Auir la pérdida de anchura se produzca desde 2017 en adelante sin apreciarse recuperación nunca, pese a que se trataba de una zona claramente acumulativa en los años previos.

DISCUSIÓN

Los resultados presentados evidencian el predominio de una disminución general de la anchura de las playas analizadas. La razón primera y más evidente hay que buscarla en las condiciones de oleaje. La comparación de

estas condiciones con los cambios en la playa prueba que de forma asociada a episodios de oleaje tranquilo se dan procesos generalizados de ensanchamientos de las playas. En la Figura 12 se han destacado estos periodos de calma y se aprecia claramente que en ellos la ganancia de anchura es general en todos los casos. Ahora bien, es muy interesante observar que en los dos primeros periodos esa recuperación es general en toda la zona de estudio pero que a partir del 3º la zona norte no llega a recuperarse. Ello es así incluso en el 4º periodo, que es cuando se aprecian los mayores avances, los cuales llegan a ser importantes –de más de 10 m- en el sector meridional. En el periodo 5º y 6º se reconoce que en toda la zona norte la recuperación es mínima o directamente no existe. De la figura se desprende, asimismo, que si los oleajes son especialmente bajos –como se sucede en el periodo 4º- la recuperación es sustancialmente mayor.

Los resultados mostrados parecen indicar que durante los temporales (resaltados con una flecha en la Figura 12) se produce un retroceso de la orilla y se aprecia que es más o menos fuerte

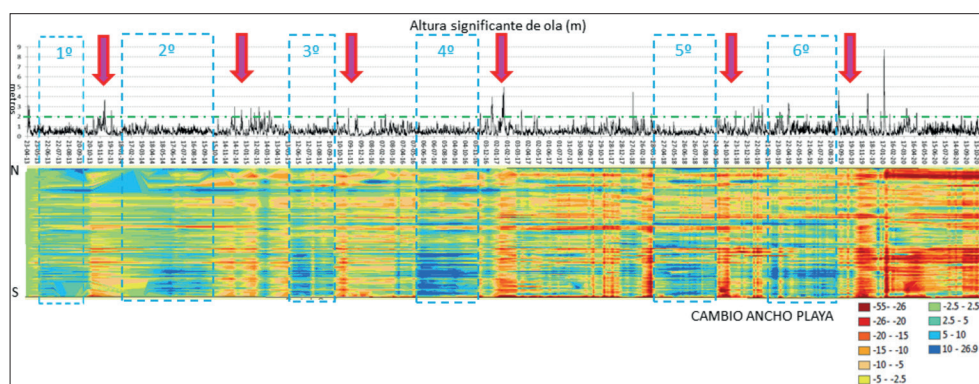


Figura 12. Interrelación entre la evolución del oleaje y los cambios en la anchura de playa a lo largo del tiempo y del espacio.

dependiendo, tanto de la altura que alcanzan las olas, como de la duración del fenómeno. Es muy llamativo que inicialmente el impacto medido como cambio de la línea de costa parece bastante homogéneo en la zona señalada, pero a partir de 2017 la situación de retroceso permanece más persistente en el tiempo en la zona norte. En la siguiente fase de temporales –otoño de 2018 e invierno de 2019—esta persistencia de las pérdidas tras el temporal se alarga más hacia el sur y sobre todo, tras el temporal de otoño de 2019 y principalmente enero de 2020, las pérdidas son fortísimas y persistentes, tanto en el extremo norte, como en toda la zona del sur.

Estos resultados sugieren que todo el sector norte –prácticamente hasta las playas de Xeraco—está teniendo cada vez más dificultad en recuperar su anchura tras los temporales, lo que indicaría que los aportes arenosos procedentes del norte son cada vez menores y que la pendiente de la playa sumergida se estaría haciendo cada vez más elevada. Así pues, estaría señalando que este sector, si bien ahora aparentemente tiene una anchura adecuada, progresivamente la irá perdiendo. Si no se pone remedio este tramo quedará afectado en un futuro cercano por problemas erosivos de características similares a los vistos en las playas del Brosquil y la Goleta.

Lo que sucede en la zona sur resulta también inquietante. De la Figura 11 se desprende que

hasta el año 2017 (y muy especialmente durante el año 2016) en toda la zona meridional (playa de l'Auir y playa norte de Gandia) se apreciaba una clara acumulación, lo que se ve alterado por la llegada de los grandes temporales. Así, tras el gran temporal de enero de 2017 la mayor parte de la zona no registra acumulación sino erosión o, en todo caso, estabilidad. De forma similar, el temporal Gloria (enero 2020) lleva asociada una fortísima erosión. Este hecho en sí mismo es muy sorprendente, en tanto que la zona sur está adosada a una trampa sedimentaria que durante décadas ha demostrado ser muy eficiente en la retención de arenas. Es razonable preguntarse por qué no se ha acumulado sedimentos en ese periodo y, más aún, por qué se pierden tantos. Es obvio que la magnitud del temporal Gloria, con una fuerte sobre elevación del nivel del agua y alturas significantes de ola de casi 9 m, implicó que buena parte del sedimento fuera arrastrado a grandes profundidades, lo que hace muy compleja su recuperación natural. No obstante, resulta llamativo que habiéndose tenido que producir un transporte de materiales tan fuerte hacia el sur, la trampa de sedimentos que crea el puerto de Gandia no haya sido tan eficiente como podría pensarse. Una explicación posible es que sí haya habido una fuerte acumulación por el transporte longitudinal pero mucho menor al volumen de arena arrastrado mar adentro en estas zonas, y por ello, en el cómputo final se aprecie esta fuerte erosión. En cualquier caso, es un tema relevante que merece de una mo-

nitorización continuada para poder realizar un diagnóstico lo más certero posible.

Otro tema que merece un análisis particularizado es el impacto a la evolución de las playas, causado tanto por las extracciones artificiales de arena de las playas como por sus aportaciones. En la Figura 13 se muestra gráficamente la evolución temporal de la playa de la Goleta de Tavernes de la Valldigna y las fechas y volumen de arenas aportados. En el periodo estudiado se han realizado 6 aportaciones, y para 4 de ellas se dispone de registros de anchura de playa pocos días después de la acción lo que permite reconocer el avance que provoca cada una de ellas. Asimismo, también resulta evidente que la playa rápidamente pierde esta anchura y vuelve a la situación previa con un ancho crítico (del orden de 15 m).

Por su parte, los procesos extractivos normalmente también dejan constancia en las variaciones de anchuras. En la Figura 10 se aprecia como la arena extraída cerca de la desembocadura del Riu Vaca (Xeraco y l'Auir) y en menor medida al norte de Gandia llamativamente coinciden con amplios tramos con tasas de pérdidas de anchura altas. Probablemente estas extracciones podrían ser las que explicasen que el sector meridional de Xeraco y el septentrional de l'Auir registren retrocesos medios de entre 5 y 7,5 m en 2018 y 2019 (Figura 11).

Es importante resaltar, en todo caso, que estas consecuencias del impacto directo de los procesos de vertido y extracción solo remarcan su

efecto a escala local, pero no necesariamente dentro de todo el sistema. De hecho, en este caso, la mayor parte de las arenas extraídas en la zona de estudio se han aportado a las playas del Brosquil y la Goleta habiendo existido un aporte neto externo mínimo, por lo que el efecto global no puede ser importante. Ahora bien, la escasísima durabilidad de los aportes realizados en la Goleta (Figura 13) prueban que este tipo de medida, con esta magnitud tan pequeña de aportes, es del todo insuficiente para resolver el problema erosivo del sector. Parece claro que los procesos erosivos ocasionados por la interrupción del transporte longitudinal causada por los diques de la desembocadura del Xúquer y que ha ido vaciando la playa sumergida, requeriría para su recuperación de un volumen de aporte de sedimentos arenosos muchísimo mayor.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un ejemplo de monitorización de las playas entre el Brosquil de Cullera y la playa norte de Gandia basado en el estudio sistemático y masivo de todas las SDS deducidas de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 registradas entre julio de 2013 y noviembre de 2020. Se han gestionado unas 220 líneas de costa para dar lugar a unos modelos de cambio espacio-temporales (de anchura y de cambios de anchura) para ser analizadas de forma eficiente y comprensiva. Los cambios mostrados en esos MET se han relacionado con las condiciones del oleaje incidente, reconociéndose una clara interrelación entre la altura significante de ola y los cambios

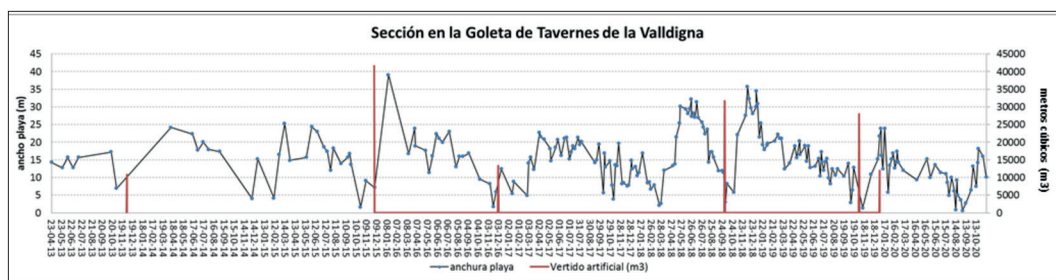


Figura 13. Evolución de la anchura de la playa en la Goleta de Tavernes y su relación con los aportes artificiales de arena para regenerarla.

de anchura de playa. Los temporales provocan retrocesos de la anchura de la playa que perduran tanto más cuanto mayor es la dimensión del temporal y, por el contrario, la recuperación o incremento de anchura se asocia a la existencia de periodos largos de oleaje tranquilo.

Los cambios observados remarcen la idea de que los procesos de recuperación a lo largo del periodo se hacen más difíciles, al menos en el sector norte de la zona estudiada. Esto probablemente se debe a que el perfil sumergido de la playa se ha ido vaciando con el paso del tiempo, y por tanto el transporte de arenas hacia el sur cada vez es menor. Este efecto de vaciamiento del perfil sumergido parece que es obvio, ahora mismo, en el Brosquil y la Goleta. Dada la poquísima duración de los ensanchamientos de playa que crean las sucesivas actuaciones de realimentación, la tendencia erosiva de este tramo de litoral parece lo suficientemente clara para no poder ser contrarrestada por los vertidos. Los resultados de la monitorización presentada sugieren incluso que toda la playa de Tavernes sur también está teniendo procesos erosivos remarcables, incluso la zona de las dunas de Tavernes. Por tanto, parece necesaria la toma de medidas más decididas encaminadas al mantenimiento físico de las playas, para lo que se requerirá de un aporte de arenas de dimensiones sustancialmente mayores a los que se han ido llevando recientemente y que ofrecen unos beneficios muy limitados en el tiempo. Si no se encaran acciones claras orientadas a la regeneración es de prever que la consideración como playa problemática o crítica se vaya extendiendo progresivamente hacia el sur.

El hecho mismo de que una zona tradicionalmente acumulativa como la apoyada en el dique norte de Gandia registre una tendencia claramente erosiva tras los temporales de 2017 y 2020 y que sea tan difícil su recuperación remarca la idea de una clara falta de aporte de nuevo sedimento. Este hecho ha de hacer

pensar en la estrategia a seguir para encontrar soluciones. Es evidente que la introducción de defensas rígidas que atrapen localmente sedimento solo conlleva trasladar el problema hacia el sur (como evidencia la historia al sur de los diques de la desembocadura del Riu Xúquer). La única opción realmente útil es aportar nuevo sedimento al sistema y hacerlo en grandes cantidades. Si además tenemos en cuenta la previsible subida del nivel del mar y el progresivo aumento de la virulencia y frecuencia de los temporales asociados al cambio climático, se concluirá que urge preparar acciones que restauren la llegada masiva de sedimentos al medio litoral como estrategia básica para asegurar la sostenibilidad de estas playas.

La metodología presentada es una herramienta clave en la monitorización de los efectos del cambio climático al permitir definir el estado y cuantificar los cambios que se están registrando en las playas a lo largo de amplios sectores del litoral. Esto permite ofrecer datos clave para entender el fenómeno y para sustentar la toma de decisiones sobre la costa. Estos datos serán los encargados de sustentar y guiar la adopción de medidas como las realimentaciones, encaminadas a permitir el mantenimiento físico de las playas o, cuando ya no sea posible, al diseño de estrategias de reordenación del territorio como el retroceso planificado que permitan la adaptación a los nuevos escenarios climáticos y la mitigación de los daños sobre las sociedades y los ecosistemas costeros.

REFERENCIAS

- Almonacid-Caballer, J. (2014). *Obtención de líneas de costa con precisión sub-píxel a partir de imágenes Landsat (TM, ETM+y OLI)*. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de València.365p
- Bishop-Taylor, R.; Sagar, S.; Lymburner, L.; Alam, I.; Sixsmith, J. (2019). Sub-Pixel Waterline Extraction: Characterising Accuracy and Sen-

- sitivity to Indices and Spectra. *Remote Sensing* 11(24), 2984.
<https://doi.org/10.3390/rs11242984>
- Cabezas-Rabadán, C.; Pardo-Pascual, J.; Almonacid-Caballer, J.; Rodilla, M. (2019b). Detecting problematic beach widths for the recreational function along the Gulf of Valencia (Spain) from Landsat 8 subpixel shorelines. *Applied Geography* Vol.110. 102047
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102047>
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019c). Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean). *Science of the Total Environment*, Vol. (691). pp.216-231
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.084>
- Cabezas-Rabadán, C.; Pardo-Pascual, J.E.; Palomar-Vázquez, J.; Ferreira, Ó.; Costas, S. (2020). Satellite Derived Shorelines at an Exposed Meso-tidal Beach. *Journal of Coastal Research* 95, 1027–1031.
<https://doi.org/10.2112/SI95-200.1>
- 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>
- Cabezas-Rabadán, C.; Rodilla, M.; Pardo-Pascual, J.; Herrera-Racionero, P. (2019a). Assessing users' expectations and perceptions on different beach types and the need for diverse management frameworks along the Western Mediterranean. *Land Use Policy* 81. pp 219–231.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.027>
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU) (1979). *Estudio de la dinámica litoral en la costa peninsular mediterránea y onubense. Provincias de Valencia, Castellón y Tarragona*. Laboratorio de Puertos Ramón Iribarren, Dir. Gral. de Puertos y Costas, Subdirección General de Ordenación y Programación.
- 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. In *Proceedings of the XVIII Congreso Nacional de TIG*, València, Spain.
<https://tig.age-geografia.es/wp-content/uploads/2021/09/actasXVIII CongresoTIG.pdf> (accessed on 8 June 2021)
- Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J.E., Cabezas-Rabadán, C., Alonso-Aransay, D., (2019). Monitorizando los cambios de superficie y volumen de la Laguna de Gallocanta mediante imágenes Landsat-8 y Sentinel-2. *X Jornadas de Geomorfología Litoral*. Castelldefels, Spain.
- Pardo-Pascual, J.E. (1991). *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. Generalitat Valenciana. Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports.
- 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 sub-pixel precision. *Remote Sensing of Environment* 123, pp. 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024>
- Pardo-Pascual, J.E., y Sanjaume, E. S. (2001): Análisis multiescalar de la evolución costera. *Cuadernos de Geografía*, 69-70. pp. 95-125
- Pardo-Pascual, J.; Sánchez-García, E.; Almonacid-Caballer, J.; Palomar-Vázquez, J.M.; Priego de los

- Santos, E.; Fernández-Sarriá, 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(2), 326.
<https://doi.org/10.3390/rs10020326>
- Pardo-Pascual, J.E.; Sanjaume, E. (2018). *Beaches in Valencian Coast*. En *The Spanish Coastal Systems*. Springer, pp. 209–236.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_10
- Pardo-Pascual, J.E., Roca Moya, R. y Segura-Beltrán, F. (2019). Análisis de la evolución de la línea de costa entre Alcossebre y Orpesa a partir de fotografía aérea. *Cuadernos de Geografía* 102. pp. 39-72.
- Sánchez-García, E.; Briceño, I.; Palomar-Vázquez, J.; Pardo-Pascual, J.; Cabezas-Rabadán, C.; Balaguer-Beser, Á. (2019). Beach Monitoring Project on Central Chile. In *Proceedings of the 5ª Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira*. Lisboa, Portugal,
http://mec2019.lnec.pt/pdf/MEC2019_LivrosResumos.pdf (accessed on 16 July 2021).
- Sánchez-García, E., Balaguer-Beser, A., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., (2019). A new adaptive image interpolation method to define the shoreline at sub-pixel level. *Remote Sensing*, 11 (16), 1880.
<https://doi.org/10.3390/rs11161880>
- 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, 103732.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103732>
- Sanjaume, E. y Pardo-Pascual, J. E. (2005): Erosion by human impact on the Valencian coastline (E of Spain). *Journal of Coastal Research*, 49. pp.76-82.
- Stafford, D. B. (1971): *An aerial photographic technique for beach erosion surveys in North Carolina*. US Army Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum 36, 115 p.
- Vos, K.; Splinter, K.D.; Harley, M.; Simmons, J.A.; Turner, I.L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 112, 104528
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha va enmarcado dentro del proyecto MONOBESAT (PID2019-111435RB-I00) a cargo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Los autores agradecen a la ESA y USGS el acceso a las imágenes de satélite, a Puertos del Estado por los datos oceanográficos, y a la DGSCM por la información referente a actuaciones de realimentación de arena.



Atlántico. Playa de Deauville (Normandia, Francia)

Foto: E. Antequera