

MONITORIZACIÓN DE LA RESPUESTA DE PLAYAS MEDITERRÁNEAS A TEMPORALES Y ACTUACIONES ANTRÓPICAS MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT

CARLOS CABEZAS-RABADÁN, JOSEP E. PARDO-PASCUAL, JAIME ALMONACID-
CABALLER, JESÚS PALOMAR-VÁZQUEZ, ALFONSO FERNÁNDEZ-SARRÍA

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT). Universitat Politècnica de
València

Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia, España

¹carcara4@alumni.upv.es, ²jepardo@cgf.upv.es, ³jaime.almonacid.caballer@gmail.com,
⁴jpalomav@upvnet.upv.es, ⁵fernan@cgf.upv.es

RESUMEN

La monitorización a gran escala y de forma continua de los cambios morfológicos en playas presenta un gran interés para la gestión costera. La posición de la línea de costa ha sido definida en tres playas del golfo de Valencia en múltiples fechas durante el periodo 1984-2014 partiendo de las imágenes Landsat 5, 7 y 8 y el sistema para la extracción de líneas de costa SHOREX. Estos datos han permitido analizar la evolución de las playas durante tres décadas, así como sus cambios a corto plazo. De este modo, se ha evaluado la capacidad de las líneas para representar la respuesta de las playas ante fenómenos de temporales costeros y actuaciones antrópicas en el medio costero. Las líneas obtenidas de SHOREX muestran un gran potencial para el seguimiento y la vigilancia del estado de las playas, a la vez que el análisis de sus cambios suministra información clave de la naturaleza de las playas.

Palabras clave: monitorización costera, teledetección, cambios en playas, Landsat, temporales costeros, regeneraciones artificiales de arena.

MONITORING THE RESPONSE OF MEDITERRANEAN BEACHES TO STORMS AND ANTHROPOGENIC ACTIONS USING LANDSAT IMAGERY

ABSTRACT

Large-scale and continuous monitoring of morphological changes on beaches is of great interest for coastal management. Shoreline positions were extracted with the system SHOREX on multiple dates on three beaches of the Gulf of Valencia from Landsat 5, 7 and 8 images from the period 1984-2014. These data made it possible to analyze the evolution of the beaches over three decades, as well as their short-term changes. In this way, the capacity of the shorelines to represent

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

the response of the beaches to coastal storms and anthropogenic actions was evaluated. The shorelines obtained from SHOREX show great potential for monitoring and surveillance of the state of the beaches, while the analysis of their changes provides key information on the nature of the beaches.

Keywords: Coastal Monitoring, Remote Sensing, Beach Dynamics, Landsat, Coastal storms, Sand Nourishment.

1. Introducción

Las playas son espacios naturales esenciales para nuestra sociedad al proporcionar protección frente a temporales marinos, constituir el hábitat de ecosistemas delicados y, sin duda, suponer un recurso indispensable para sustentar la economía de las regiones costeras (Alexandrakis *et al.*, 2015; Prodder *et al.*, 2016). Sin embargo, buena parte de las playas está sometidas a procesos erosivos graves desde hace décadas. Esto es especialmente remarcable en las playas valencianas (Pardo, 1991; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005) en las que el 26 % presenta problemas (European Commission, 2009). Estos procesos en su mayor parte aparecen impulsados por acciones humanas al alterar el transporte sedimentario (Obiol-Menero y Pitarch-Garrido, 2011), limitar su entrada al sistema o construir sobre cordones dunares o excesivamente cerca del mar eliminando posibles adaptaciones del sistema playa-duna e inmovilizando depósitos de arena. Asimismo, los procesos se encuentran agravados por el ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático (Nicholls y Cazenave, 2010; Sutherland y Gouldby, 2003).

En este contexto erosivo se pueden producir importantes pérdidas en los espacios (Anfuso y Martínez, 2009; Ballesteros *et al.*, 2018), tanto de forma asociada a inundaciones y vulnerabilidad del frente costero, como a la pérdida del espacio recreativo en las playas. El mantenimiento físico de la playa, con una morfología que sea percibida de forma positiva por los usuarios y turistas, constituye un importante foco de atención de los gestores (Valdemoro y Jiménez, 2006), que en ocasiones se traduce en actuaciones sin la planificación adecuada. Estas intervenciones suponen habitualmente una solución puntual y cortoplacista, pudiendo agravar la situación en segmentos costeros distantes. Independientemente de su propósito, los efectos de las actuaciones realizadas en el espacio litoral se deberían monitorizar durante largos periodos de tiempo mediante registros objetivos, cuantificables, y cubriendo amplios segmentos de costa. Esto aparece respaldado por el requerimiento de llevar a cabo programas de vigilancia y seguimiento asociados a los estudios de impacto ambiental (Ley 21/2013). Sin embargo, resulta habitual que las actuaciones carezcan de un seguimiento adecuado, impidiendo conocer su verdadera efectividad o impacto sobre el litoral (Ludka *et al.*, 2018).

Por su parte, los eventos con mayor capacidad de alterar la morfología de las playas en breves periodos de tiempo son los temporales costeros. Sus impactos y posterior recuperación han suscitado el interés de la comunidad científica (Ferreira, 2006; Karunarathna *et al.*, 2014; Sénéchal *et al.*, 2017; Splinter *et al.*, 2014, 2011), especialmente en el caso de tormentas consecutivas, quedando importantes cuestiones todavía sin resolver.

Ya sean intervenciones antrópicas o eventos de temporal, las preguntas referentes sobre sus efectos sobre las playas deben ser respondidas mediante datos morfológicos previos y posteriores a los impactos. Solo así resulta posible definir una situación de playa estable, su máxima erosión, así

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

como determinar en qué momento y en qué medida se alcanza la recuperación. Asimismo, dada la importancia de las playas, y ante el riesgo erosivo que potencialmente se incrementará en el futuro cercano, resulta indispensable implementar sistemas de monitorización que registren sistemáticamente el estado de la costa en grandes áreas y periodos de tiempo. La disponibilidad de un sistema de seguimiento continuo facilitaría y homogenizaría los patrones de análisis de cambios.

Sin embargo, la obtención de datos sobre la morfología de las playas resulta costosa y complicada. Las técnicas empleadas tradicionalmente para realizar un seguimiento de los cambios (fotointerpretación, levantamientos DGPS, video-monitorización) no permiten suministrar datos de grandes tramos de litoral con suficiente frecuencia. Una alternativa interesante proviene de las imágenes de satélite de resolución media, pues registran sistemáticamente la totalidad del territorio con elevada frecuencia. Así, actualmente y considerando de forma combinada las plataformas Landsat 8 y Sentinel-2 es posible adquirir imágenes de un mismo lugar cada 2.9 días (Li y Roy, 2017). Diferentes metodologías de extracción automática de la línea de costa han sido diseñadas para superar las restricciones de la limitada resolución de las imágenes. Almonacid-Caballer (2014) evaluó en escolleras 348 líneas procedentes de escenas Landsat con un sesgo menor a 1.47 m (y desviaciones menores a 5.8 m), mientras que en playas arenosas Pardo-Pascual *et al.*, (2018) establecieron que el RMSE variaba según el sensor empleado, siendo de 8 m y 7.4 m para imágenes Landsat 7 de alta y baja ganancia, respectivamente. Por su parte, las líneas extraídas de Landsat 8 o Sentinel-2 mostraban un RMSE 6.6 m. A partir de esta solución se ha desarrollado el sistema SHOREX (Palomar-Vázquez *et al.*, 2018 a,b), que permite definir líneas de costa de forma eficiente.

El objetivo de este trabajo es utilizar las líneas de costa extraídas mediante SHOREX para estudiar los cambios en tres playas arenosas del sur del Golfo de Valencia. El análisis se realiza tanto a medio plazo, a lo largo de tres décadas (1984-2014), como a corto plazo, buscando evaluar hasta qué punto las líneas de costa definidas permiten reconocer los efectos de alteraciones naturales, como los temporales, y humanas, como los movimientos artificiales de sedimento.

2. Zona de estudio

El trabajo se ha realizado en tres playas arenosas de un mismo sector costero cubriendo un total de 8 km de litoral. Se localizan en la mitad sur del Golfo de Valencia (Fig. 1), una costa micromareal (rango medio de marea de 0,3 m y máximo de 0.7 m) de oleaje suave, con altura de ola significativa (H_s) de 0.7 m y periodo de pico (T_p) de 4.2 s de promedio, si bien durante las tormentas se han alcanzado H_s de 5 m y T_p de 15 s (Pardo-Pascual *et al.*, 2014).

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

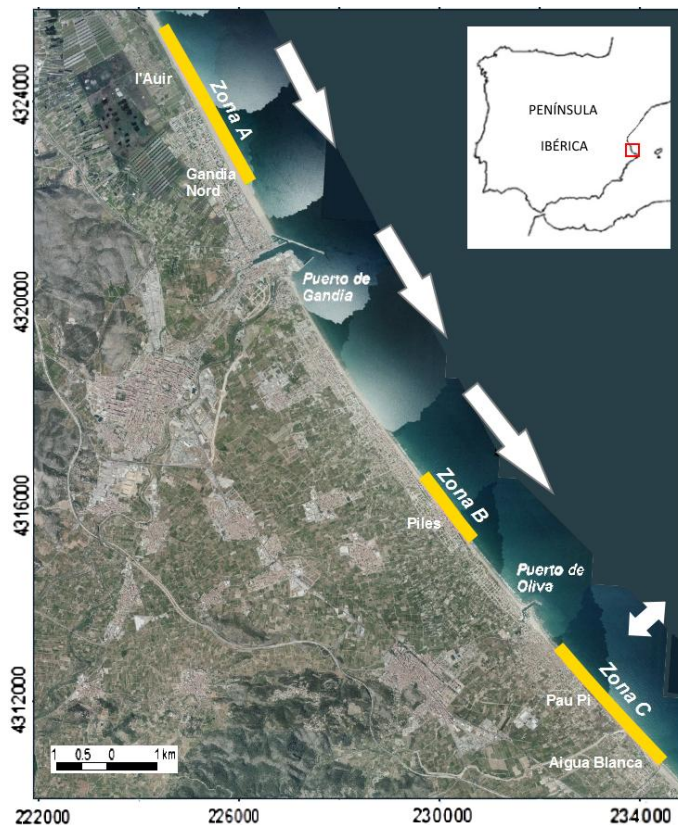


Figura 1. Localización de las zonas analizadas y la deriva sedimentaria (PNOA, UTM ETRS89 31N).

Se trata de playas de arena localizadas en el mismo sector costero, relativamente cercanas, que constituyen el recurso básico para el turismo “de sol y playa” que se desarrolla en la región (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2019). Las playas se localizan en un sector históricamente acumulativo como demuestra la morfología con el desarrollo de dobles restingas y amplios cordones dunares (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2003; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2019). Este sector ha sufrido diferentes intervenciones antrópicas y presenta obstáculos al transporte longitudinal, lo que ha contribuido a otorgar a cada una de las playas una geomorfología diferente (Tab. 1, adaptada de Cabezas-Rabadán, 2015) y, a priori, diferente respuesta ante los impactos.

Tabla 1. Tamaño medio del sedimento y pendiente media de las playas en las tres zonas de estudio.

| Zona | Media en la rompiente (μm) | Media en el estrán (μm) | Pendiente media 2009 ($\text{tg } \alpha$) |
|------|---|--------------------------------------|--|
| A | 227.20 | 213.19 | 0.070 |
| B | 268.48 | 228.19 | 0.106 |
| C | 251.20 | 188.79 | 0.050 |

De norte a sur encontramos la zona A (3.6 km de longitud), un tramo acumulativo apoyado en el dique norte del puerto de Gandia que comprende las playas de l'Auir y Gandia Nord. La más

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

septentrional presenta un estado relativamente natural, sin edificaciones y con una alineación dunar, mientras que la segunda, se encuentra limitada interiormente por un paseo marítimo. La zona B se corresponde con la playa de Piles (1.7 km de longitud), con problemas de anchura insuficiente desde el punto de vista recreativo (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2019), relacionados con su situación del puerto de Gandía y con la construcción del paseo marítimo sobre la antigua alineación dunar, que impide el reajuste natural de la playa (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005). La zona C ocupa las playas de Pau-Pi y Aigua Blanca de Oliva (3 km de longitud), y mantiene en su parte meridional un cordón dunar.

Destaca la presencia de dos puertos: el de Gandía, de mayores dimensiones, y el de Oliva, mucho más pequeño. Mientras que el primero actúa como trampa al transporte de sedimentos hacia el sur, el segundo ya no, debido al progresivo cambio de orientación de la costa, de NNW-SSE a NW-SE. Esto se debe a que, mientras las dos zonas localizadas más al norte (Zonas A y B) se encuentran afectadas por una deriva norte-sur la zona C, más al sur, queda en el límite de afección de este transporte de sedimentos (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019).

Durante las últimas décadas, las playas de la zona han estado sometidas a distintas actuaciones antrópicas directas dentro del sistema litoral (diques portuarios que interrumpen el transporte longitudinal de sedimentos, paseos marítimos que acortan artificialmente el espacio móvil de la playa, etc.). Este trabajo se focaliza sobre los movimientos de arena en las playas Gandía y Piles, ejerciendo en muchos casos Piles como receptora de la arena extraída de las playas de Gandía Nord y l'Auir (Cabezas-Rabadán, 2015).

3. Materiales, datos y métodos

3.1. Definición de la posición de la línea de costa

Este trabajo toma como datos de partida las bandas del infrarrojo medio de los satélites Landsat 5 y 7 (banda 5, 155-175 nm) y Landsat 8 (banda 6, 157-165 nm), todas ellas de 30 m de resolución. Las imágenes fueron tomadas entre junio de 1984 y septiembre de 1987, y entre julio de 1999 y junio de 2014, y están disponibles gratuitamente en los servidores del USGS (United States Geological Survey). Sobre estas imágenes, ya ortorectificadas por el USGS, se ha refinado el registro entre escenas mediante técnicas de correlación sub-píxel (Guizar-Sicarios *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011), permitiendo corregir las imágenes con un error inferior a la décima del píxel (Almonacid-Caballer *et al.*, 2017). Las líneas de costa a nivel subpíxel se deducen ajustando una función polinómica sobre un vecindario centrado en la posición aproximada de la costa a nivel píxel. La extracción se ha realizado automáticamente empleando el sistema SHOREX (Palomar-Vázquez *et al.*, 2018 a, b), sustentado en el algoritmo originalmente descrito en Pardo-Pascual *et al.*, (2012) y Almonacid-Caballer (2014). La precisión se estima en un RMSE de 6.6 m y 7.4 m para imágenes Landsat 8 y Landsat 7 respectivamente según el trabajo de Pardo-Pascual *et al.*, 2018.

Se debe destacar que la zona A, localizada en el solape de dos pasadas de satélite, dispone del doble de imágenes que las zonas B y C (con una influencia sobre los análisis que se discute posteriormente). De este modo, SHOREX ha permitido obtener un total de 257 líneas de costa en la zona A, y 125 en las zonas B y C. Los datos fueron derivados de trabajos previos en la zona (Cabezas-Rabadán, 2015; Cabezas-Rabadán *et al.*, 2018).

3.2. Identificación de temporales y de intervenciones humanas

A partir de los datos históricos de oleaje se identificaron los episodios de temporal más significativos a lo largo del periodo 1999-2014. Para este propósito se emplearon los datos de altura de ola significativa del punto SIMAR 2083108 frente a las playas estudiadas (0.08° W 39.00° N), obtenidos de Puertos del Estado (www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx). Dada la cercanía de las tres playas fue posible asumir condiciones de oleaje comunes. Los episodios de temporal fueron seleccionados aplicando el método POT (*peak over threshold method*) sobre el conjunto de datos de oleaje (Dorsch *et al.*, 2008). Para ello se empleó una probabilidad de ocurrencia del 5 % siguiendo el criterio aceptado en la literatura (Angnuureng *et al.*, 2017). Esto permitió la identificación de episodios con una Hs igual o mayor a 1.4 m. Asimismo, la duración se definió como mayor a un ciclo de marea (12 h) (Angnuureng *et al.*, 2017; Sénéchal *et al.*, 2015). La intensidad de cada uno de los episodios (m²h) se definió como un producto de la máxima Hs (en metros), al cuadrado, por su duración (en horas), obteniendo así una aproximación a su energía total (Sénéchal *et al.*, 2015). Siguiendo estos criterios, 181 temporales fueron seleccionados, de los cuales el 10 % con mayor intensidad fueron finalmente considerados por ser presumiblemente aquellos que potencialmente podrían generar mayores cambios en la posición de la línea de costa.

En cuanto a las acciones antrópicas, los datos referentes a intervenciones realizadas en el entorno de las playas estudiadas fueron suministrados por la Demarcación de Costas de Valencia (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente). Las actuaciones, divididas en vertidos y dragados de arena, fueron integradas en un entorno SIG con el propósito de localizarlas temporal y espacialmente. A partir de estos datos, aquellas acciones cercanas a las playas estudiadas y que presentaron mayor magnitud fueron seleccionadas en base al volumen de arena desplazado, pues son aquellas con mayor capacidad de repercutir en la morfología y en la posición de la línea de costa.

3.3. Análisis de cambios en la línea de costa

Los cambios de posición de la línea de costa fueron cuantificados empleando el software Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Thieler *et al.*, 2009) mediante mediciones en transectos perpendiculares a la costa distribuidos cada 100 m.

A medio plazo, las líneas de costa definidas a lo largo de tres décadas (1984-2014) fueron empleadas para identificar, cartografiar y cuantificar la evolución de las tres zonas de estudio. La tasa de cambio en cada transecto fue calculada con DSAS relacionando la posición de la línea de costa a largo del tiempo mediante una función lineal (estadístico Linear Regression Rate, en m/año).

A corto plazo, los cambios como respuesta a los eventos de temporal y a actuaciones antrópicas también fueron estudiados, considerando cada zona de estudio como una unidad. En cada uno de los transectos se definieron las distancias de las diferentes líneas de costa a la primera de ellas (26 de junio de 1984), que fue empleada como referencia. Estas distancias fueron posteriormente promediadas para cada una de las tres zonas. Así, para cada una se definió la secuencia temporal de cambios de la línea a lo largo del tiempo. Esta evolución a lo largo del tiempo fue empleada para identificar (i) los episodios de temporal de mayor magnitud, y (ii) extracciones, vertidos y reacomodaciones de arena más significativos. Una vez identificados, la secuencia de cambios de la línea de costa fue analizada, prestando especial atención a su posición anterior y posterior a estos eventos

3.4. Análisis comparativo entre playas

Finalmente, se realizó una comparación de la evolución de la línea de costa en las tres zonas seleccionadas, en un intento de evaluar cuán distinto es el comportamiento de cada playa respecto a las otras.

Para cada una de las fechas comunes se restó el cambio de posición media de la línea de costa de una zona al registrado por las otras. De este modo, un cambio que afecta únicamente (o en mayor medida) a una de las zonas se traduce en posiciones más alejadas del eje horizontal. Para que la comparación fuese posible, únicamente se consideraron las líneas de costa adquiridas en las tres zonas en la misma fecha, de modo que para la zona A se consideró el mismo número de posiciones de la línea de costa que para las zonas B y C. Al mismo tiempo, dado que las líneas de costa corresponden al mismo instante, las condiciones de oleaje y de nivel del mar se han asumido comunes, haciendo que los resultados sean comparables.

4. Resultados

Los resultados aparecen divididos, en primer lugar, atendiendo a su escala temporal entre los cambios a largo y a corto plazo. Estos últimos, a su vez, analizan de forma separada la respuesta a temporales y a actuaciones antrópicas. Finalmente, se presenta un análisis comparativo de los cambios entre las tres playas estudiadas.

4.1. Cambios a medio plazo (1984 – 2014)

En primer lugar, se muestran las tasas de cambio (m/año) registradas en cada transecto a lo largo del periodo 1984-2014 (Fig. 2). Los valores positivos van asociados a una progradación de la línea de costa y a un aumento de la anchura de la playa (acreción) mientras que, por el contrario, los valores negativos van ligados a retrocesos (erosión).

En general, destaca el dominio de la tendencia erosiva en las tres zonas estudiadas. La zona A (playas de l'Auir y Gandia Nord) registró tendencias erosivas en su mayor parte (75 % de los transectos), aunque también acumulativas (25 %). Las tasas de erosión fueron menores a los 0,25 m/año en el 70 % de los transectos, mientras que la superaron en el 30 % restante. Al mismo tiempo, las tasas de acumulación fueron mayores a 0,25 m/año en el 77 % de transectos, y menores en un 33 % de los mismos. El mapa evidencia un comportamiento claramente diferente a lo largo de la zona. Así, mientras al norte predominó la erosión (gradualmente más agresiva), en la parte sur destacó la acumulación, cada vez más marcada. Por su parte, en la zona B (Piles), todos los transectos sufrieron una tendencia claramente erosiva, con un retroceso mayor de 0.25 m/año en el 65 % de los transectos. Finalmente, la zona C (Oliva) registró erosión en su práctica totalidad (93 % de los transectos), y solo dos de ellos presentaron acumulación. La erosión fue menor a 0.25 m/año en el 68 % de los casos, mientras que en el 32 % superó esta magnitud. En esta zona también se registró una clara diferenciación geográfica, destacando la erosión en su parte sur.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

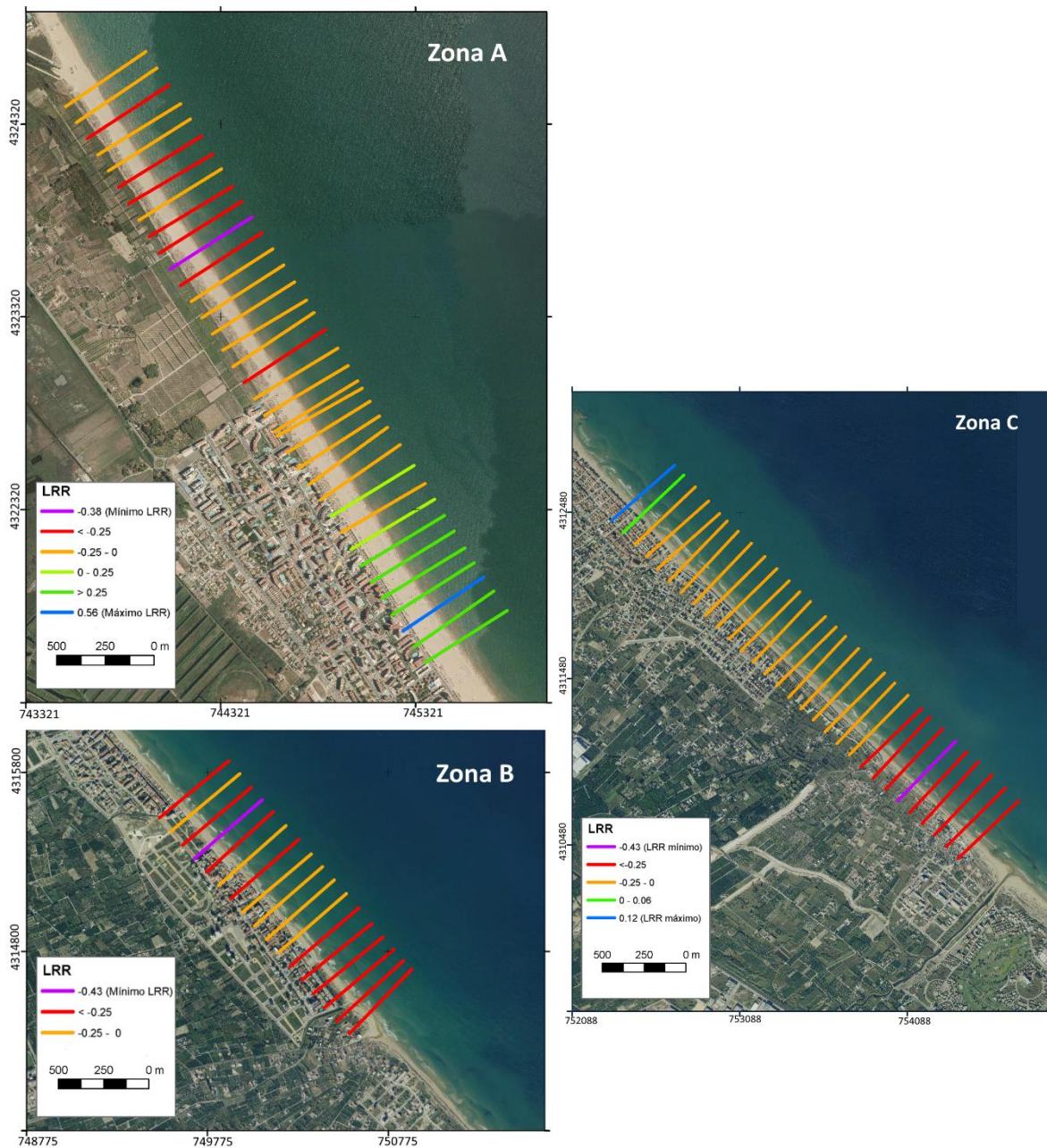


Figura 2. Tasa de cambio (1984-2014) en cada transecto según la tasa de cambio lineal (m/año): Valores positivos en verde, con el máximo de cada zona en azul. Valores negativos en naranja y rojo, con su mínimo en morado. Ortofoto PNOA, UTM ETRS89 30N.

4.2. Cambios a corto plazo

4.2.1. Respuesta de las playas a temporales

En primer lugar, se muestra la identificación de temporales entre 1999 y 2014 a partir de los datos de oleaje, reconociendo su frecuencia en cada año estudiado, así como sus características energéticas (Tab. 2). Ello ha permitido categorizar cada uno de los años según el promedio de intensidad de sus temporales.

Tabla 2. Temporales identificados entre 1999 y 2014 y el promedio anual de su duración (h), Hs (m), Hsmax (m) e intensidad (m²h).

| Año | Nº tormentas | Promedio de la duración (h) | Promedio de Hs (m) | Promedio de Hs max (m) | Promedio de la intensidad (m ² h) |
|------|--------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|--|
| 1999 | 7 | 26.7 | 1.8 | 2.1 | 56.4 |
| 2000 | 8 | 22.1 | 1.7 | 1.9 | 44.9 |
| 2001 | 14 | 38.1 | 2.0 | 2.6 | 111.9 |
| 2002 | 7 | 30.0 | 2.0 | 2.6 | 85.1 |
| 2003 | 17 | 34.5 | 1.9 | 2.2 | 84.4 |
| 2004 | 15 | 29.2 | 1.8 | 2.1 | 62.3 |
| 2005 | 6 | 29.7 | 1.9 | 2.4 | 78.8 |
| 2006 | 9 | 36.6 | 1.9 | 2.3 | 92.3 |
| 2007 | 16 | 32.4 | 1.9 | 2.4 | 81.2 |
| 2008 | 11 | 29.7 | 1.8 | 2.2 | 75.8 |
| 2009 | 9 | 25.0 | 1.9 | 2.4 | 79.3 |
| 2010 | 10 | 35.8 | 1.9 | 2.6 | 107.9 |
| 2011 | 9 | 27.9 | 1.8 | 2.2 | 62.8 |
| 2012 | 18 | 33.6 | 1.9 | 2.4 | 96.0 |
| 2013 | 20 | 29.1 | 1.9 | 2.5 | 75.1 |
| 2014 | 5 | 30.8 | 1.9 | 2.4 | 80.3 |

Se observan grandes diferencias en la cantidad y la intensidad total de temporales registrados en cada uno de los años analizados. En cuanto al número de eventos destaca que, mientras en ciertos años como 2014 y 2005 se registraron tan sólo 5 y 6 eventos de temporal, durante 2012 y 2013 se llegaron a registrar hasta 18 y 20 respectivamente. La intensidad promedio también muestra grandes cambios entre los diferentes años. Así, resulta llamativo el enorme salto que se produce en la intensidad registrada durante 1999 y 2000 (56.4 y 44.9 m²h respectivamente), frente al año 2001, que es en el que se registra mayor intensidad (111.9 m²h), seguido por 2010 y 2012 (107.9 y 96.0 m²h).

Del conjunto de temporales detectados empleando la metodología expuesta se seleccionó el 10 % con mayor intensidad (Tab. 3), con el objetivo de estudiar su repercusión sobre las líneas de costa detectadas a partir de las imágenes Landsat.

Tabla 3. Temporales de mayor intensidad registrados entre 1999 y 2014, ordenados cronológicamente, que conforman el análisis a corto plazo. Se muestra su duración (h), así como su Hs (m), Hs max (m) e intensidad (m²h) promedio.

| Fecha | Duración (h) | Hs med (m) | Hs min (m) | Hs max (m) | Rango (m) | Intensidad (m ² h) |
|----------|--------------|------------|------------|------------|-----------|-------------------------------|
| 09-11-01 | 70 | 2.49 | 1.45 | 3.8 | 2.30 | 262.5 |
| 14-11-01 | 62 | 2.75 | 1.45 | 6.1 | 4.65 | 378.2 |
| 06-05-02 | 54 | 2.34 | 1.45 | 3.3 | 1.89 | 180.36 |
| 15-10-03 | 108 | 2.17 | 1.41 | 3.0 | 1.54 | 318.6 |
| 17-11-03 | 69 | 2.49 | 1.42 | 3.2 | 1.74 | 218.0 |
| 19-12-06 | 122 | 2.26 | 1.45 | 3.1 | 1.69 | 383.1 |
| 26-01-07 | 56 | 2.32 | 1.50 | 3.8 | 2.25 | 210 |
| 25-11-07 | 89 | 1.93 | 1.42 | 2.4 | 1.01 | 216.27 |
| 04-03-08 | 69 | 2.35 | 1.46 | 3.2 | 1.74 | 220.8 |
| 09-10-08 | 59 | 2.14 | 1.47 | 3.4 | 1.96 | 202.4 |
| 13-12-09 | 66 | 2.86 | 1.42 | 5.8 | 4.39 | 383.5 |
| 07-01-10 | 60 | 2.32 | 1.43 | 3.7 | 2.22 | 219 |
| 25-01-10 | 64 | 2.46 | 1.41 | 4.5 | 3.08 | 287.4 |
| 11-10-10 | 49 | 2.22 | 1.43 | 3.8 | 2.38 | 186.7 |
| 02-02-12 | 99 | 2.39 | 1.58 | 3.5 | 1.89 | 343.5 |
| 06-02-12 | 61 | 2.22 | 1.41 | 3.1 | 1.69 | 189.1 |
| 11-11-12 | 95 | 2.68 | 1.44 | 4.1 | 2.70 | 393.3 |
| 30-11-13 | 46 | 2.61 | 1.43 | 4.1 | 2.68 | 189.1 |

Resulta interesante fijar la atención no solo en el valor de la intensidad, sino también en la altura significativa máxima y en las fechas. Al hacerlo, se observa que hay “momentos críticos” con eventos muy cercanos en el tiempo y olas de gran altura. Así, en noviembre de 2001 se observan dos temporales en un lapso de cinco días, el segundo de los cuales presenta una altura significativa máxima de más de 6 m (la mayor de la serie). De forma similar, en el periodo entre diciembre de 2009 y enero de 2010 coinciden tres grandes temporales, el primero de ellos con olas con altura significativa de hasta 5.81 m, mientras que el último se acercó a los 4.5 m.

Para reconocer el diferente impacto de los distintos temporales sobre la evolución de los tres tramos de playa estudiados se ha superpuesto sobre un eje temporal los 18 temporales seleccionados y los cambios registrados por las líneas de costa definidas por SHOREX a partir de las imágenes Landsat (Fig. 3).

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

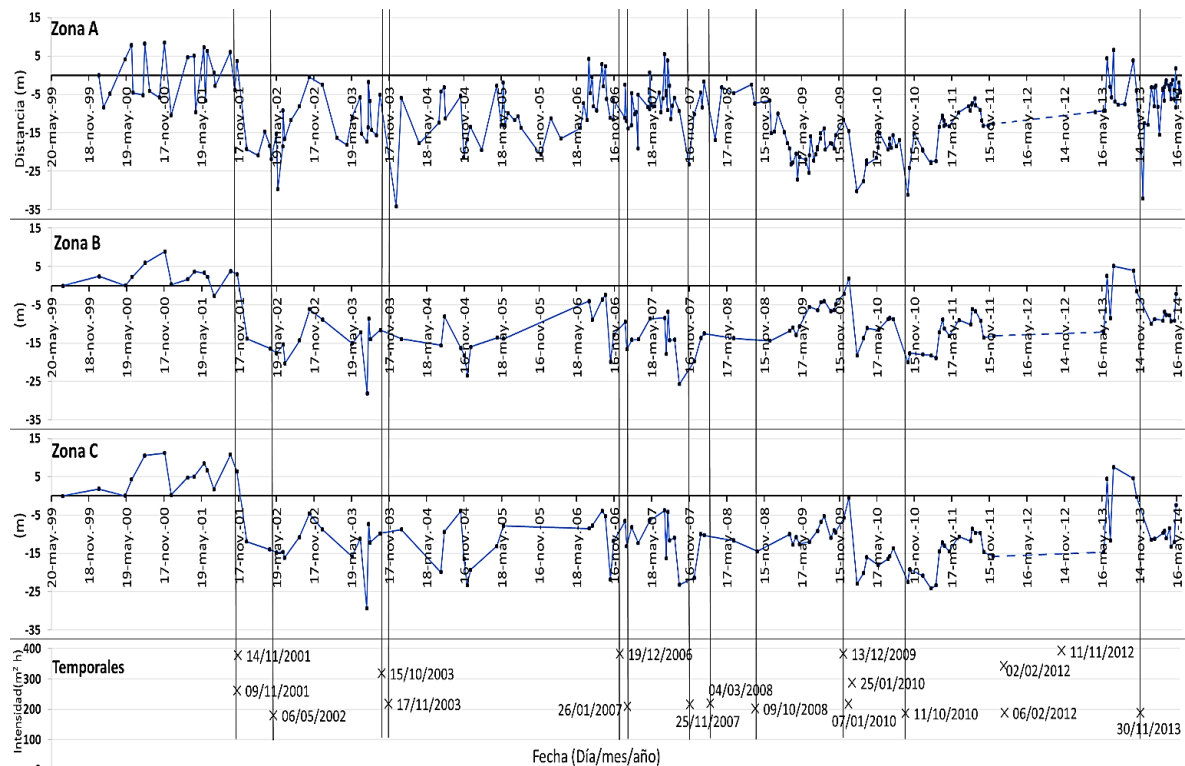


Figura 3. Evolución de las líneas de costa (m) en las tres zonas de estudio junto a los 18 temporales de mayor intensidad ($m^2 \cdot h$) identificados temporalmente de forma precisa en el gráfico inferior (junto a líneas verticales orientativas a efectos interpretativos). Como referencia, se parte de las posiciones en 6/1/2000 (Zona A) y 14/7/1999 (B y C). No aparecen registros durante el año 2012 por no disponer de imágenes Landsat.

Durante la mayor parte del periodo de estudio la línea de costa mantuvo un comportamiento negativo o de retroceso respecto a la posición original. Este retranqueo o retroceso tuvo un punto de arranque claramente asociado a los temporales de noviembre de 2001. A partir de estos, las tres zonas estudiadas registraron pérdidas muy marcadas, de entre 10 y 20 m, mayores en la zona A que en las otras dos. El retroceso de la línea de costa asociado al impacto de estos temporales se mantuvo varios años. No fue hasta el otoño de 2006 en el que en la zona A se alcanzó la posición previa a dichos temporales, sin que en las otras dos zonas se llegara a alcanzar la posición anterior.

Entre diciembre 2009 y enero 2010 un segundo momento crítico conformado por tres eventos de gran intensidad estableció un nuevo retroceso general en las tres zonas de estudio. Los efectos, además de ser claramente perceptibles fueron, al igual que en 2001, sostenidos en el tiempo, si bien en este caso resultan menos evidentes por la falta de registros de la posición de la línea de costa durante 2012. Resulta llamativo analizar el impacto del primer temporal (13/12/09) en las tres zonas pues, si bien en la zona A se produjo un retroceso de la línea de costa, en las zonas B y C se advierte un ligerísimo avance. Sin embargo, tras los otros dos temporales, el efecto recesivo resultó muy marcado en todas las zonas.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

Los eventos de temporal de menor intensidad, así como aquellos que aparecen de forma aislada también presentaron efectos de interés. Algunos, como el de mayo de 2002, simplemente reforzaron el mantenimiento de una línea de costa retranqueada, sin generar mayores pérdidas. El temporal de octubre de 2003, uno de los más largos (108 h), presentó un valor de intensidad alto ($m^2h = 318$). Sin embargo, y a pesar de que un mes después hubo otro temporal, el impacto en las playas fue bastante limitado. Este resultó prácticamente inapreciable en las zonas B y C, si bien en la zona A sí que provocó un fuerte retroceso del que se recuperó rápidamente. Los eventos de diciembre de 2006 y enero de 2007, a pesar de su larga duración (122 horas el evento de diciembre de 2006), presentaron efectos de muy baja magnitud. Los temporales de marzo y octubre de 2008 provocaron un retroceso muy puntal en la zona A no sostenido en el tiempo (en las otras dos zonas no se dispone de registros de la línea de costa coincidentes). El efecto del temporal del 11/10/10, en un momento en que las playas presentaban una anchura muy inferior a la habitual, tuvo efectos muy débiles. Por el contrario, el temporal del 30/11/13 en que las playas habían recuperado buena parte de su anchura habitual provocó un fuerte retroceso en todas las zonas.

Comparando la evolución de la playa y el promedio de intensidad de los temporales por año (Tab. 2) se observa que son los años con menor intensidad de temporales (1999, 2000 y 2011) aquellos en que las playas tienden a ganar anchura, contrastando claramente con aquellos otros años con mayores temporales que evidencian un retroceso.

4.2.2. Respuesta de las playas a actuaciones antrópicas

Los desplazamientos artificiales de arenas —extracciones en playas con sobrante sedimentario y vertido en las que presentan problemas de erosión—provocan alteraciones puntuales y localizadas en la anchura de las playas y, por tanto, desplazamientos en la línea de costa. La figura 4 muestra la evolución de la línea de costa en las zonas de estudio A y B, entre mayo de 2005 y mayo de 2011, de forma asociada al periodo en el que se realizaron extracciones y vertidos artificiales de arena. Entre febrero y mayo de 2009 más de 150.000 m³ de arena dragada de la playa de Gandía (zona A) fueron vertidos en la playa de Piles (B) y en Bellreguard y Miramar, playas adyacentes justo al norte. Se registró en ese periodo un retroceso importante de la línea de costa en la zona A, coincidente con una progradación en la zona B. De forma similar, entre enero y junio de 2008 se realizó otro traslado de arena de mucha menor magnitud (cerca de 46.500 m³) desde la playa de Gandía (A) a la de Piles (B), cuyos efectos no son tan apreciables: aparece un retroceso de unos 10 m en la zona A de rápida recuperación, mientras que la zona B no muestra cambios, si bien es cierto que para la fecha en que se observa ese retroceso en la zona A no se dispone de datos para la B. Del mismo modo, otro vertido de 38.000 m³ tuvo lugar entre mayo y junio de 2010, coincidente con una ligera progradación en Piles. En la zona A también se realizaron diversas reacomodaciones de arena, de las cuales, la realizada en julio de 2007 en Gandía Nord, de más de 23.000 m³ va sucedida temporalmente con la máxima progradación alcanzada en los últimos seis años.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

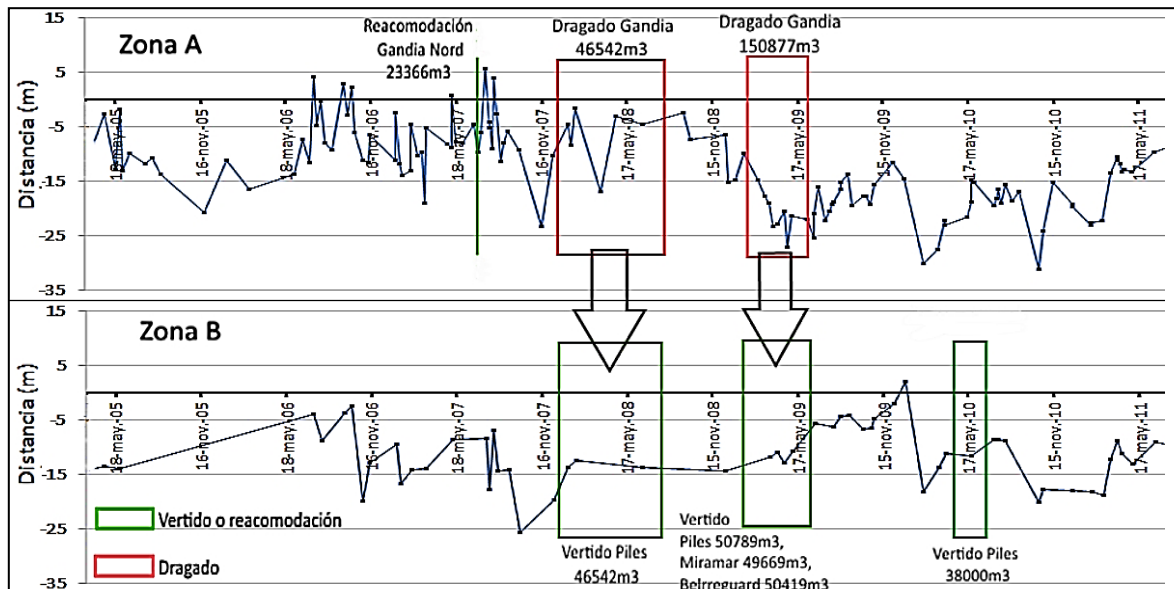


Figura 4. Evolución media de la línea de costa en las zonas A y B. Actuaciones de dragado en la zona A y de vertido en B y otras playas anexas. Como referencia, las posiciones en 6/1/2000 (A) y 14/7/1999 (B).

4.3. Comparación de la respuesta entre las diferentes playas

Este procedimiento analítico pretende resaltar las semejanzas y diferencias entre las respuestas a las distintas acciones (naturales o antrópicas) a la que se ven sometidas las playas. La representación de las diferencias en los cambios registrados en cada playa frente a otra tomada como referencia permite reconocer si ha seguido un cambio similar, si éste ha seguido el mismo o distinto sentido, así como igual o distinta magnitud (Fig. 5). El reconocimiento y cuantificación de estas diferencias permite reconocer las causas que explican la diferente respuesta en las distintas playas estudiadas.

La comparación evidencia que, en la mayor parte de los casos, todas las playas siguen una evolución común, lo que explica que las diferencias entre ellas habitualmente no superen los 5 m. Esta magnitud, cercana a la incertidumbre de definición de cada una de las líneas de costa, indicaría que no hay cambios significativos. Destaca que eventos como los temporales de noviembre de 2001, causantes de grandes alteraciones en la anchura de playa, no resulten destacables al comparar las diferentes zonas, lo que remarca la idea de que sus impactos se produjeron en las tres zonas con dimensiones parecidas. Sin embargo, hay fechas particulares en que una zona registra cambios mayores o de sentido inverso a las otras. Así, se aprecia que la zona A presenta cambios mayores respecto a la otras dos, indicando una mayor variabilidad, lo que a su vez sugiere que la pendiente del frente de playa es menor. Esto es perfectamente esperable dado que la zona A se sitúa en la playa apoyada en los diques del puerto de Gandia, y por tanto se trata de una playa claramente acumulativa. Se pueden observar también fechas en que la zona C sigue un patrón de cambio radicalmente distinto a las otras dos zonas (verano-otoño 2004, verano 2006) lo que se explicaría por la diferente orientación de estos tramos de costa que, a su vez, provocan una modificación

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

sustancial, en el sentido y magnitud del transporte longitudinal de sedimentos. Finalmente, este método de análisis permite registrar claramente el retroceso causado por la extracción de 150.000 m³ arenas de la zona A frente a las otras dos zonas. Por el contrario, respecto a las otras actuaciones que movilizaron menores volúmenes de arena no es posible distinguir cambios asociados, reforzando la idea de que no tuvieron repercusiones apreciables.

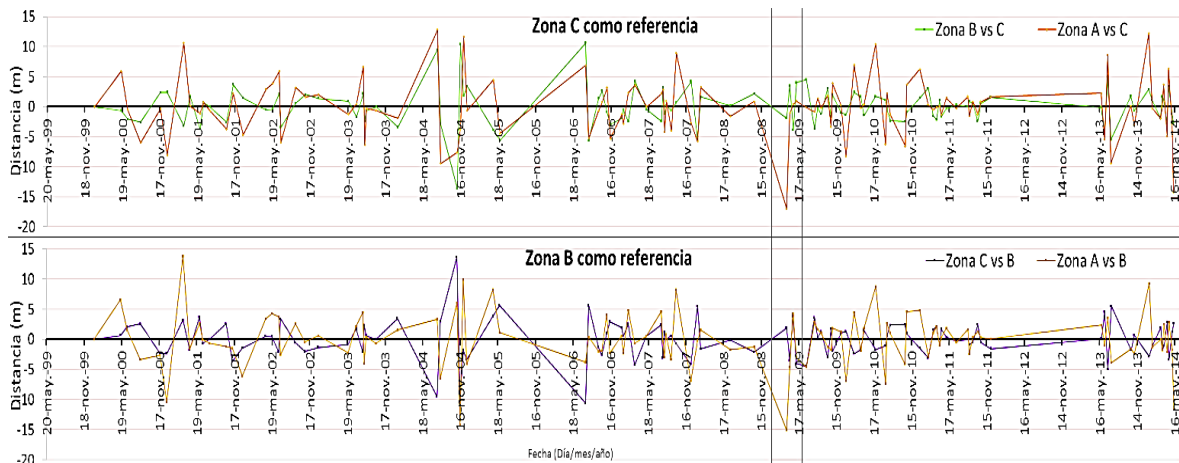


Figura 5. Comparativa entre zonas de la magnitud y sentido de cambio de la línea de costa. La parte superior muestra los cambios de las zonas A (tono marrón) y B (tono verde) frente a la C (actuando aquí como línea de referencia). El gráfico inferior compara las zonas A (marrón) y C (morado) respecto a B (referencia). El principal movimiento de arena de A a B se identifica entre barras verticales.

5. Discusión

Partiendo de las imágenes Landsat 5, 7 y 8, con una precisión inferior a fuentes convencionales como las ortofotos o el DGPS (Pardo-Pascual *et al.*, 2018, 2012), ha sido posible obtener numerosos registros de la posición de la orilla a lo largo de un mismo año, hasta cubrir el periodo 1984-2014. Esto ha posibilitado caracterizar la variabilidad y la dinámica interanual de las playas a escala regional con un alto nivel de automatismo, y sustentar los análisis evolutivos en una mayor cantidad de datos. Pese a la elevada variabilidad de la línea de costa, incluso en periodos muy cortos de tiempo, el empleo de hasta un total 257 mediciones (125 en las zonas B y C) otorga gran robustez a los resultados frente a otras técnicas más precisas pero que se basan en muy pocos registros a lo largo del tiempo.

El registro de las posiciones de la línea de costa permite establecer relaciones con las características morfológicas de cada playa y con las intervenciones antrópicas, tanto por la construcción de obstáculos al transporte longitudinal de sedimentos como mediante los vertidos artificiales (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005). Analizando los cambios a lo largo de tres décadas, resulta evidente que la acreción observada en la parte sur de la zona A va asociada a la acumulación forzada por el dique norte del puerto de Gandia, mientras que

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

la erosión de la zona B está directamente relacionada con este obstáculo. Por su parte, la zona C, localizada al final de una célula sedimentaria tradicionalmente acumulativa (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019), presenta una ligera erosión. Este cambio de tendencia confirmaría el paso de un status acumulativo a otro en el que domina la falta de sedimento en el sistema. Esto, ya sugerido por otros trabajos previos (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005), vendría confirmado por un aumento en el tamaño del sedimento en estas playas (Cabezas-Rabadán, 2015; Pardo-Pascual y Sanjaume, 2019).

Los resultados aportados demuestran que el análisis exhaustivo de grandes paquetes de líneas de costa es útil para reconocer, cuantificar, cartografiar y comparar el efecto a corto plazo de fenómenos tales como los temporales costeros o los movimientos artificiales de arena, en línea con otros trabajos previos (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2018; Pardo-Pascual *et al.*, 2014). Como se ha podido observar, la mayoría de los grandes eventos de temporal analizados han ido asociados a retrocesos en la línea de costa. Aparentemente, estos efectos únicamente se mantienen por periodos de días o, a lo sumo, pocas semanas. Todavía existe incertidumbre en aspectos como la acción de temporales consecutivos (*storm clusters*) (Sénéchal *et al.*, 2017) o su capacidad de recuperación (Angnuureng *et al.*, 2017). Por tanto, disponer de información cuantitativa para monitorizar la costa resulta extremadamente útil para mejorar la comprensión de la respuesta de las playas (Anthony, 2013).

A escalas temporales todavía mayores, presenta gran interés estudiar la relación con el conjunto de temporales registrados a lo largo de un año. Así, la acumulación o sucesión de eventos de temporal parece jugar un papel esencial en la evolución de las playas. Como ejemplo de ello, el año 2001, especialmente rico en cantidad y magnitud de temporales costeros (Tab. 2), constituye un punto de inflexión en la serie temporal, al generar grandes retrocesos en las tres zonas de las que las playas parecen tardar años en recuperarse y volver a estados anteriores (Fig. 3). Esta acción erosiva sostenida en el tiempo va en gran medida ligada a que en noviembre de 2001 tuvo lugar uno de los temporales más severos de los que se tiene constancia sobre el Mediterráneo occidental. Tal y como han destacado diferentes trabajos (Obiol-Menero, 2003; Ramis *et al.*, 2001; Julià, 2003), este evento (o conjunto de eventos) generó importantes procesos erosivos al movilizar gran cantidad de sedimento, y fue sucedido por tormentas hasta la primavera del 2002 (Pardo-Pascual *et al.*, 2014). Un fenómeno de retroceso parecido, aunque de menor magnitud, volvió a suceder en las tres zonas de estudio entre finales de 2009 y principios de 2010 (Fig. 3). De forma opuesta, la mayoría de las progradaciones registradas a medio plazo parecen ser fruto de una acumulación progresiva en el tiempo, posiblemente por periodos de mayor calma marina, pues aparecen de forma simultánea y similar en las tres zonas.

En cuanto a las actuaciones antrópicas, los resultados aportados han evidenciado que las acciones de vertido y dragado de arena realizadas que movilizaron mayor volumen se han visto reflejadas en los cambios en línea de costa detectados en las playas estudiadas. Pese a ello, este trabajo se ha visto limitado por la falta de definición respecto al lugar y momento exacto en que realizaron las actuaciones, añadiendo incertidumbre a la fuente de imprecisión que supone la definición de las líneas de costa.

Las construcciones e intervenciones humanas sobre el litoral deben someter sus proyectos al procedimiento de evaluación de impacto ambiental, con el propósito de mantener los impactos sobre el medio bajo control. La posición de la línea de costa podría aportar información básica para los programas de seguimiento y vigilancia asociados. De igual modo, resulta habitual que para

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

mantener la anchura de playa se lleven a cabo actuaciones de emergencia sin la planificación ni visión de futuro necesarias (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2019; Jiménez *et al.*, 2011), como por ejemplo en forma de dragados y vertidos. Sin embargo, pese a los grandes impactos ambientales y económicos que conllevan, en muchas ocasiones se muestran poco efectivos tras cortos periodos de tiempo (Aragonés *et al.*, 2015; Hanson *et al.*, 2002; Peterson y Bishop, 2005; Speybroeck *et al.*, 2006). Resulta indispensable para un buen manejo del litoral que estas actuaciones tengan seguimiento apropiado que permita valorar su adecuación y efectividad real.

En este trabajo se ha mostrado el análisis diferencial de la dinámica seguida por cada una de las zonas estudiadas. Las líneas de costa definidas corresponden al mismo instante, con condiciones de oleaje y nivel del mar comunes, lo que las hace comparables. Así, los diferentes cambios en playas con características similares se pueden asociar a actuaciones locales como vertidos o dragados. Este tipo de análisis podría ser útil para definir la afección espacial y temporal de las intervenciones antrópicas a lo largo de la costa hasta permitir cuantificar los desequilibrios generados por obstáculos al transporte sedimentario. Por otra parte, los cambios de posición de la línea de costa van ligados a las características morfológicas de cada playa. Así, parece que la variabilidad intra-anual de la línea de costa definida mediante teledetección va ligada tanto a la pendiente de la playa como a la textura del sedimento (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2017). De este modo, esta metodología puede aportar información clave sobre la naturaleza de las playas, y podría llegar a emplearse para estimar otros parámetros relevantes.

Los cambios intra-anales pueden permitir un acercamiento a las situaciones más desfavorables para el mantenimiento de las funciones de playa a lo largo del año (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2019; Cabezas-Rabadán y Pardo-Pascual, 2017). Esto puede resultar útil para los gestores pues permitiría identificar los momentos en que presenta una anchura inadecuada para un uso recreativo, tal y como ha ocurrido en la playa de Piles (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2019). Asimismo, un seguimiento continuo sería útil para detectar prematuramente tendencias erosivas, así como para definir el momento adecuado para actuar.

En cuanto a las limitaciones metodológicas, dado que la recuperación de las playas micromareales puede tener lugar en pocos días (Ranasinghe *et al.*, 2012), es posible que el retroceso y la recuperación tras los temporales se produzca en periodos en que no se dispone de datos, imposibilitando una detección adecuada. A su vez, la capacidad de realizar un seguimiento de cambios a corto plazo puede estar muy influenciada por la insuficiente densidad de datos. Así, en la zona A, donde se ha dispuesto del doble de imágenes por el solape entre pasadas del satélite Landsat, se han podido detectar cambios de escala más corta (por ejemplo, un fuerte retroceso tras un temporal de dimensión mediana y una rápida recuperación) que no aparecen reflejados en las zonas B y C. Sin embargo, la disponibilidad de una nueva fuente de datos como las imágenes Sentinel-2 con las que es posible alcanzar niveles de precisión incluso superiores (Pardo-Pascual *et al.*, 2018) presumiblemente minimizará este problema. La disponibilidad actual de Sentinel-2 junto a los satélites Landsat 7 y 8 establece un nuevo escenario con una mayor disponibilidad de datos. Esto abre nuevas posibilidades en el empleo de SHOREX para el análisis y seguimiento de los cambios provocados por temporales y acciones humanas.

Otra limitación remarcable es la precisión con que se definen las posiciones de la línea de costa. El presente estudio se ha realizado empleando el sistema de extracción SHOREX siguiendo la metodología expuesta en Pardo-Pascual *et al.* (2018) con la que aparecen imprecisiones del orden

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

de los 7,5 m para las líneas de costa procedentes de imágenes Landsat 7 (y a priori Landsat 5) y de 6,6 m para las Landsat 8. Esto provoca que las magnitudes de cambio registradas arrastren esta incertidumbre. Considerando las posibles aplicaciones de la metodología, una mejora de los rangos de precisión resulta clave. Esta mejora resulta más que posible atendiendo a las soluciones metodológicas propuestas en las nuevas versiones de SHOREX. Por tanto, es de esperar que en un futuro muy próximo se esté en condiciones de aplicar estos métodos con mayores precisiones, lo que permitirá registrar las magnitudes de los cambios con mayor grado de certeza y seguridad.

6. Conclusiones

La metodología presentada proporciona la capacidad técnica para estudiar la dinámica de las playas a partir de una novedosa fuente de información cartográfica: las imágenes satelitales de resolución espacial media. Las líneas de costa derivadas de ellas adquieren gran valor debido a su alta repetitividad, permitiendo registrar sistemáticamente grandes áreas y periodos de tiempo. Los resultados evidencian su utilidad para describir el estado y los cambios de las playas, posibilitando su monitorización y diagnóstico. Así, ha sido posible detectar y cuantificar cambios de la costa directamente relacionados con la acción de los temporales y de actuaciones humanas como los vertidos y las extracciones de arena. El análisis de series de datos suficientemente amplias ha permitido reconocer que únicamente episodios de temporal –y en especial las series de temporales– que superan determinadas magnitudes provocan cambios significativos. Por el contrario, episodios de menor magnitud pueden provocar cambios puntuales, pero de rápida recuperación. En todo caso, se evidencia la enorme importancia de los episodios altamente energéticos en la evolución a medio plazo de las playas, provocando retrocesos significativos. La recuperación tras estos eventos es lenta, y solo se da si perduran condiciones de oleaje de energía limitada. Asimismo, se demuestra que los eventos han generado una respuesta desigual en cada una de las playas dependiendo de sus condiciones morfológicas (anchura y pendiente) y de su disposición respecto a estructuras artificiales (diques portuarios o espigones).

El aprovechamiento final de las líneas de costa depende en gran medida de la precisión alcanzada y de la frecuencia de adquisición de datos, algo en lo que la metodología presentada en este trabajo destaca frente a otras técnicas. Dado que una de las tres playas estudiadas disponía de prácticamente el doble de líneas de costa, se ha podido constatar el gran interés que tiene disponer de un elevado número de datos a lo largo del tiempo, pues de otra manera muchas de las variaciones acaecidas quedan desdibujadas o sin registrar.

El sistema de extracción SHOREX aplica el flujo de trabajo necesario para suministrar de forma relativamente sencilla amplias series de líneas de costa actualizadas a lo largo de grandes tramos del litoral. Esto aporta el enfoque holístico y homogéneo que requieren los sistemas de monitorización costera. La gran importancia que las playas tienen en la sociedad, tanto económica como medioambientalmente, junto la existencia de procesos erosivos que se verán incrementados por el cambio climático, justifica la investigación en este tipo de trabajos.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha beneficiado del contrato de investigación FPU15 otorgado por el Ministerio de educación, ciencia y deporte al primer autor, así como por fondos del proyecto RESETOCOAST (CGL2015-69906-R) del Programa Retos-2015 del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

8. Bibliografía

Alexandrakis, G., Manasakis, C., Kampanis, N.A. (2015). "Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective". *Ocean Coast. Manag.* 111, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.04.001>

Almonacid-Caballer, J. (2014). "Detección subpixel de la línea de costa". Universitat Politècnica de València, Valencia. Tesis doctoral.

Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J., & Ruiz, L. (2017). Evaluating fourier cross-correlation sub-pixel registration in landsat images. *Remote Sensing*, 9(10), 1051. <https://doi.org/10.3390/rs9101051>

Anfuso, G., Martínez, J.Á. (2009). "Assessment of coastal vulnerability through the use of GIS tools in south sicily (Italy)". *Environ. Manage.* 43, 533–545. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9238-8>

Angnuureng, D.B., Almar, R., Senechal, N., Castelle, B., Addo, K.A., Marieu, V., Ranasinghe, R. (2017). "Shoreline resilience to individual storms and storm clusters on a meso-macrotidal barred beach". *Geomorphology* 290, 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.007>

Anthony, E.J. (2013). "Storms, shoreface morphodynamics, sand supply, and the accretion and erosion of coastal dune barriers in the southern North Sea". *Geomorphology* 199, 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.007>

Aragonés, L., García-Barba, J., García-Bleda, E., López, I., Serra, J.C. (2015). "Beach nourishment impact on Posidonia oceanica: Case study of Poniente Beach (Benidorm, Spain)". *Ocean Eng.* 107, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.005>

Ballesteros, C., Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I., Bosom, E. (2018). "Erosion consequences on beach functions along the Maresme coast (NW Mediterranean, Spain)". *Nat. Hazards* 90, 173–195. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3038-5>

Cabezas-Rabadán, C. (2015). "Análisis de la línea de costa y su relación con los parámetros morfológicos en playas de la Safor". Universitat de València. Tesis de máster.

Cabezas-Rabadán, C., Almonacid-caballer, J., Pardo-pascual, J. E., Soriano-González, J. (2017). "Variabilidad de la línea de costa a partir de imágenes de satélite y su relación con la textura del sedimento". En 1st Congress in Geomatics Engineering (CIGeo). Universitat Politècnica de València, pp. 153-161.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J.E. (2017). "Monitorizando la anchura de las playas mediante imágenes Landsat 8 en costas micromareales mediterráneas". *Geo-Temas* 17, 159–162.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J.E., Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Fernández-Sarría, A. (2018). "La posición de la línea de costa extraída de imágenes satelitales como herramienta de seguimiento y análisis de cambios en playas mediterráneas", in: López-García, M., Carmona, P., Salom, J., Albertos, J. (Eds.), XVIII Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica. Departament de Geografia. Universitat de València, València, pp. 36–46.

Cabezas-Rabadán, C., Rodilla, M., Pardo-Pascual, J.E., Herrera-Racionero, P. (2019). "Assessing users' expectations and perceptions on different beach types and the need for diverse management frameworks along the Western Mediterranean". *Land use policy* 81, 219–231. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.027>

Dorsch, W., Newland, T., Tassone, D., Tymons, S., Walker, D. (2008). "A Statistical Approach to Modelling the Temporal Patterns of Ocean Storms". *J. Coast. Res.* 246, 1430–1438. <https://doi.org/10.2112/07-0847.1>

European Commission (2009). "The Economics of Climate Change Adaptation in EU Coastal Areas". Country overview and assessment. Belgium, Brussels.

Ferreira, Ó. (2006). "The role of storm groups in the erosion of sandy coasts". *Earth Surf. Process. Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.1378>

Guizar-Sicairos, M., Thurman, S. T., Fienup, J. R. 2008. Efficient subpixel image registration algorithms. *Optics Letters*, 33(2), 156-158. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.33.000156>

Hanson, H., Brampton, A., Capobianco, M., Dette, H. H.H., Hamm, L., Lastrup, C., Lechuga, A., Spanhoff, R. (2002). "Beach nourishment projects, practices, and objectives - A European overview". *Coast. Eng.* 47, 81–111. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00122-9)

Jiménez, J.A., Gracia, V., Valdemoro, H.I., Tonatiuh Mendoza, E., Sánchez-Arcilla, A. (2011). "Managing erosion-induced problems in NW Mediterranean urban beaches". *Ocean Coast. Manag.* 54, 907–918. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.003>

Julià, T. (2003). "El temporal de mar de noviembre de 2001 y sus efectos en el litoral catalán. Universitat Politècnica de Catalunya". Dept. d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.

Karunarathna, H., Pender, D., Ranasinghe, R., Short, A.D., Reeve, D.E. (2014). "The effects of storm clustering on beach profile variability". *Marine Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.007>

Li, J., Roy, D. (2017). "A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring". *Remote Sens.* 9, 902. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>

Ludka, B.C., Guza, R.T., O'Reilly, W.C. (2018). "Nourishment evolution and impacts at four southern California beaches: A sand volume analysis". *Coast. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.02.003>

Nicholls, R.J., Cazenave, A. (2010). "Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones". *Science* (80-.). 328, 1517–1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>

Obiol-Menero, E.M. (2003). "La regeneración de playas como factor clave del avance del turismo valenciano". *Cuad. Geogr. Univ. Val.* 121–145.

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

Obiol-Menero, E.M., Pitarch-Garrido, M.D. (2011). "El litoral turístico valenciano. Intereses y controversias en un territorio tensionado por el residencialismo". *Bol. la Asoc. Geogr. Esp.* 177–200. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21138/bage.1349>

Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J.E., Cabezas-Rabadán, C., Fernández-Sarría, A. (2018a). "Sistema para la extracción masiva de líneas de costa a partir de imágenes de satélite de resolución media para la monitorización costera: SHOREX", in: López-García, M., Carmona, P., Salom, J., Albertos, J. (Eds.), XVIII Congreso de Tecnologías de La Información Geográfica. Departament de Geografia. Universitat de València, València, pp. 25–35.

Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J.E., Sanchez-García, E. (2018b). "SHOREX: a new tool for automatic and massive extraction of shorelines from Landsat and Sentinel 2 imagery", in: 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab). Santander.

Pardo-Pascual, J., 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 Sens.* 10, 326. <https://doi.org/10.3390/rs10020326>

Pardo-Pascual, J.E. (1991). "La erosión antrópica en el litoral valenciano", Tesis doctorales. 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 subpixel precision". *Remote Sens. Environ.* 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-Alemay, 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., Sanjaume, E. (2019). "Beaches in Valencian Coast", in: Morales, J. (Ed.), *The Spanish Coastal Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp. 209–236. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_10

Peterson, C.H., Bishop, M.J. (2005). "Assessing the environmental impacts of beach nourishment". *Bioscience* 55, 887–896. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0887:ateiob\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0887:ateiob]2.0.co;2)

Prodger, S., Russell, P., Davidson, M., Miles, J., Scott, T. (2016). "Understanding and predicting the temporal variability of sediment grain size characteristics on high-energy beaches". *Marine Geology*. 376, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.04.003>

Ramis, C., Alonso, S., Homar, R. (2001). "Análisis preliminar del temporal del 10 al 12 de Noviembre de 2001 en Baleares" Universitat de les Illes Balears.

Ranasinghe, R., Holman, R., Schipper, M. de, Lippmann, T., Wehof, J., Duong, T.M., Roelvink, D., Stive, M. (2012). "Quantifying nearshore morphological recovery time scales using argus video imaging: Palm Beach, Sydney and Duck, North Carolina", in: *Coastal Engineering 2012*. pp. 1–7.

Sanjaume, E., Pardo-Pascual, J.E. (2019). "Littoral Dunes on Valencia Coast", in: *The Spanish Coastal Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp. 631–659. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_27

Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual J. E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J., Fernández-Sarría A. (2019): "Monitorización de la respuesta de playas mediterráneas a temporales y actuaciones antrópicas mediante imágenes Landsat", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 119-139. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.640>

Sanjaume, E., Pardo-Pascual, J.E. (2005). "Erosion by human impact on the Valencian coastline (E of Spain)". *J. Coast. Res.* 76–82.

Sanjaume, E y Pardo-Pascual, J.E. (2003). "Cuadernos de geografía". *Cuad. Geogr.* ISSN 0210-086X, Nº 73-74, 2003, págs. 183-206 183–206.

Sénéchal, N., Castelle, B., R. Bryan, K. (2017). "Storm Clustering and Beach Response", in: Ciavola, P., Coco, G., Sénéchal, N., Castelle, B., R.Bryan, K. (Eds.), *Coastal Storms*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 151–174. <https://doi.org/10.1002/9781118937099.ch8>

Sénéchal, N., Coco, G., Castelle, B., Mariou, V. (2015). "Storm impact on the seasonal shoreline dynamics of a meso- to macrotidal open sandy beach (Biscarosse, France)". *Geomorphology* 228, 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.025>

Speybroeck, J., Bonte, D., Courtens, W., Gheschiere, T., Grootaert, P., Maelfait, J.P., Mathys, M., Provoost, S., Sabbe, K., Stienen, E.W.M., Van Lancker, V., Vincx, M., Degraer, S. (2006). "Beach nourishment: An ecologically sound coastal defence alternative? A review". *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 16, 419–435. <https://doi.org/10.1002/aqc.733>

Splinter, K.D., Carley, J.T., Golshani, A., Tomlinson, R. (2014). "A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion". *Coast. Eng.* 83, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.001>

Splinter, K.D., Strauss, D.R., Tomlinson, R.B. (2011). "Assessment of post-storm recovery of beaches using video imaging techniques: A case study at Gold Coast, Australia". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49, 4704–4716. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2136351>

Sutherland, J., Gouldby, B. (2003). "Vulnerability of coastal defences to climate change", in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering*. Thomas Telford Ltd, pp. 137–145. <https://doi.org/10.1680/wama.156.2.137.38008>

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, A. (2009). "Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change". *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.* 2008 1278.

Valdemoro, H.I., Jiménez, J.A. (2006). "The Influence of Shoreline Dynamics on the Use and Exploitation of Mediterranean Tourist Beaches". *Coast. Manag.* 34, 405–423. <https://doi.org/10.1080/08920750600860324>

Wang, C. L., Zhao, C. X., & Yang, J. Y. (2011). Local upsampling Fourier transform for high accuracy image rotation estimation. In *Advanced Materials Research* (Vol. 268, pp. 1488-1493). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.268-270.1488>

