





Detección y caracterización de megacúspides a partir de líneas de costa derivadas de sensores remotos

Megacusps detection and characterization from remote sensing derived shorelines

Eduard Angelats^a, Riccardo Angelini^b, Francisco de-Urmeneta^a, y Francesca Ribas^c

^aGeomatics Research Unit, Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya - CERCA, , eduard.angelats@cttc.cat, , francisco.urmeneta@cttc.cat; ^bDepartment of Civil and Environmental Engineering, University of Florence, , riccardo.angelini@unifi.it y ^cPhysics Department, Universitat Politècnica de Catalunya, , francesca.ribas@upc.edu .

How to cite: Angelats, E.; Angelini, R.; de-Urmeneta, F. y Ribas, F. 2024. Detección y caracterización de megacúspides a partir de líneas de costa derivadas de sensores remotos. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral*. Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. <https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18720>

Abstract

Megacusps, or periodic alongshore shoreline undulations, are a phenomenon of great scientific interest and of significant importance for beach management. Current knowledge of megacusps, through static video monitoring stations, has limitations in terms of spatial and geographical coverage, being limited to a few kilometres. The use of shorelines derived from satellite imagery, such as S2 or PlanetScope, as input to detect automatically the megacusps presence / absence and characterize them in large geographical areas is very appealing. In this context, this paper presents a methodology to automatically detect coastal sandy segments with megacusps using shorelines derived from aerial and satellite imagery and wavelet analysis, and to characterise the megacusps in these segments using a peak detector algorithm. The methodology has been evaluated on a 10 km sandy beach segment located southern from Llobregat Delta, allowing to detect and characterise megacusps both from satellite derived and high-resolution orthophotos shorelines with similar results.

Keywords: *Subpixel shoreline extraction, beach morphology, megacusps, wavelet analysis, Remote Sensing, Sentinel-2, Aerial orthophoto*

Resumen

Las megacúspides, u ondulaciones periódicas de la línea de costa, son un fenómeno de gran interés científico y de importancia significativa para la gestión de las playas. El conocimiento de las megacúspides, a través de estaciones fijas de vídeo monitoreo, presenta limitaciones en términos de cobertura espacial y geográfica, limitándose a unos pocos kilómetros. El uso de líneas de costa derivadas de imágenes de satélite, como S2 o PlanetScope, como punto de partida para detectar automáticamente la presencia / ausencia de megacúspides y caracterizarlas en grandes áreas geográficas es muy atractivo. En este contexto, este trabajo presenta una metodología para detectar automáticamente segmentos arenosos con presencia de megacúspides usando líneas de costa de imágenes aéreas y satelitales mediante un análisis basado en wavelets, y caracterizarlas usando un algoritmo detector de picos. La metodología ha sido evaluada en un segmento de playa arenosa de 10 km situado al sur del Delta del Llobregat, permitiendo detectar y caracterizar megacúspides tanto a partir de líneas de costa derivadas de satélite como de ortofotos aéreas con resultados similares.

Palabras clave: *línea de costa subpíxel, morfología de playa, megacúspides, análisis wavelets, Teledetección, Sentinel-2, Ortofotografía aérea*

1. Introducción

Las regiones costeras desempeñan un papel crucial debido a su rica biodiversidad y a sus usos recreativos y económicos por parte del hombre. La vigilancia del entorno costero es esencial en el marco actual del cambio climático y suele implicar la identificación de diversos indicadores, siendo la línea de costa uno de los más frecuentes. Existen varias definiciones de este indicador, pero en este trabajo nos referimos a la línea de costa instantánea, identificada automáticamente a través de imágenes de satélite o digitalizada por el operador como "verdad sobre el terreno" a partir de ortomosaicos obtenidos de fotos aéreas. Tradicionalmente la recogida de datos en grandes zonas costeras suele ser realizada manualmente por un operador humano. Este método requiere mucho tiempo, es costoso y está sujeto a las limitaciones y decisiones de cada operador. Por el contrario, la teledetección satelital se ha convertido en un recurso inestimable para la vigilancia costera, ya que ofrece las ventajas de una cobertura a gran escala y una adquisición frecuente de datos, todo ello con una gran eficiencia económica.

Trabajos recientes han demostrado que las imágenes de satélite proporcionadas por Sentinel-2 (S2) y PlanetScope, pueden emplearse para extraer la línea de costa con una resolución subpíxel y con una exactitud de pocos metros (Doherty et al., 2022; Pardo-Pascual et al., 2023, Vos et al., 2023). Las imágenes S2 y PlanetScope son imágenes multispectrales que permiten extraer de una forma sencilla las líneas de costa basándose en la reflectancia espectral diferente entre la tierra y el agua. Para ello pueden aplicarse distintos índices (por ejemplo, Normalized Difference Water Index (NDWI), entre otros) y diferentes métodos de automatización (por ejemplo, umbralización o *thresholding* y/o métodos de clasificación supervisada o no supervisada). Los satélites S2 proporcionan imágenes gratuitas, siempre que no haya nubes con una frecuencia de 5 días y un tamaño de píxel de 10, 20 y 60 m en función de la banda espectral. Las imágenes PlanetScope pueden llegar a tener una frecuencia diaria y un tamaño de píxel de 3,7 – 4,2 m por cada una de las bandas, aunque las imágenes no son de libre acceso.

Las líneas de costa de las playas arenosas suelen presentar diversas características morfológicas debido a las variaciones en las condiciones hidrodinámicas y el movimiento del sedimento. Ejemplos de estas características son las megacúspides, ondulaciones periódicas a lo largo de la línea de costa con longitudes de onda de cientos de metros y amplitudes transversales a la costa de unos pocos a decenas de metros (de Swart et al., 2022). El desarrollo de megacúspides en playas arenosas puede estar vinculado tanto a condiciones persistentes de oleaje intermedio como a episodios de tormentas que pueden implicar una fuerte erosión, especialmente en las bahías de las megacúspides (Castelle et al., 2015). Esta fuerte erosión temporal puede afectar a los diferentes servicios de las playas, así como a las dunas y/o a las infraestructuras permanentes. Por lo tanto, profundizar en su conocimiento es importante para la gestión de las playas.

En la actualidad, la investigación sobre megacúspides presenta una serie de limitaciones, ya que los estudios son escasos y suelen estar restringidos espacialmente, y a nivel temporal pueden cubrir periodos no demasiado largos. La implantación de sistemas de *video monitoring* puede ofrecer una observación muy buena desde el punto de vista temporal y una alta resolución espacial (de Swart et al., 2022). No obstante, estos sistemas presentan restricciones en cuanto a su cobertura espacial y geográfica, limitándose a unos pocos kilómetros. Para superar estas limitaciones, proponemos utilizar líneas de costa extraídas de manera automática a partir de imágenes de satélite multispectrales de S2 y PlanetScope. Estas líneas de costa, con una precisión suficientemente alta como para delinear ondulaciones, ofrecerían una cobertura geográfica mejorada manteniendo una buena resolución espacial y temporal, permitiendo así enriquecer sustancialmente la información disponible sobre este tipo de fenómenos.

En este contexto, este trabajo presenta una metodología basada en dos fases para detectar y caracterizar megacúspides automáticamente usando líneas de costa de imágenes areas y satelitales (S2 y PlanetScope). La primera fase utiliza un análisis de wavelets para detectar de manera automática segmentos arenosos con presencia de megacúspides. En aquellos segmentos donde se han detectado megacúspides se lleva a cabo su caracterización mediante un algoritmo de detección de picos y valles que permite estimar una serie de indicadores que describen las megacúspides (longitud de onda, sinuosidad, sigma).

2. Zona de estudio y fuentes de datos

En este trabajo se ha analizado un segmento arenoso de 10 km situado en el sur del Delta de Llobregat, entre los términos municipales de Castelldefels y Gavà (Barcelona, España) (Fig. 1). Este segmento de playa se caracteriza por un régimen micro mareal y es una zona con presencia de megacúspides, muy dinámica desde el punto de vista espacial y temporal. En la fase inicial de prueba y validación de la metodología para la extracción de la línea de costa, se han utilizado tres ortomosaicos que cubren el Delta del Llobregat, proporcionados por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (Mayo 2017 y 2019, Junio 2021). Estas imágenes de alta resolución (20-25 cm) se han utilizado para digitalizar manualmente las líneas de costa que sirven de referencia, considerando la línea en la posición intermedia (aproximada) entre el *runup* y el *rundown* (es decir, en el medio de la *swash zone*). Tras confirmar las fechas donde se adquirieron las imágenes de los ortomosaicos, se eligieron las imágenes de satélite multispectrales S2 que presentaban una nubosidad mínima o nula, y que coincidían estrechamente con las fechas de las imágenes aéreas (distancia máxima de 3 días).

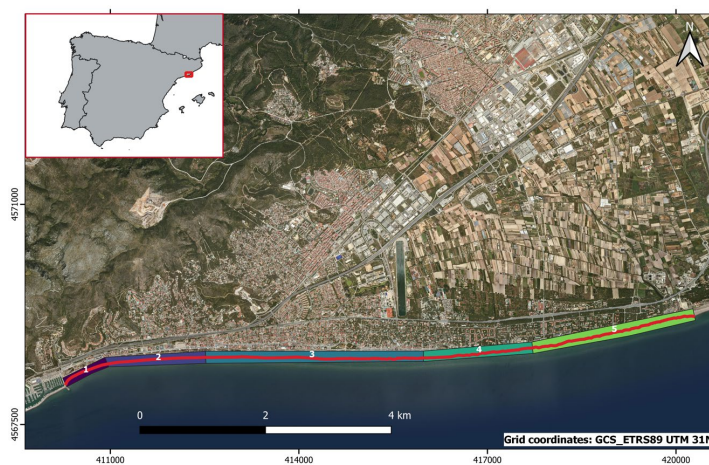


Fig. 1 Localización de la zona de estudio y subsegmentos analizados. La línea roja es un ejemplo de línea de costa utilizada. Los polígonos muestran los subsegmentos analizados y su número identificativo.

3. Metodología

Las líneas de costa derivadas de satélite de S2 y PlanetScope, y que se han usado en este trabajo, se extrajeron siguiendo el procedimiento detallado en Angelini et al., 2024, que permite detectar de manera automática líneas de costa con precisión subpixel. En este trabajo se han utilizado las líneas de costa derivadas utilizando el índice NDWI (para S2) y la banda NIR (PlanetScope) seguido de una clasificación no supervisada basada en GMM (Gaussian Mixture Model) para S2 y K-Means (PlanetScope). El criterio para seleccionar esta combinación fue porque obtuvo un valor menor de distancia media absoluta (DAM). Esta métrica se obtuvo a partir de la comparación entre las líneas de costa derivadas de satélite y las de referencia (obtenidas a partir de la fotointerpretación de los ortomosaicos), utilizando transectos transversales a la costa espaciados cada 10 m.

La primera fase de la metodología ha incluido diferentes pasos para poder detectar de manera automática, a partir de una línea de costa derivada de imágenes satelitales o aérea, aquellos segmentos de costa con presencia de megacúspides. El primer paso consistió en un remuestro de la línea de costa para tener puntos cada 2 metros. A continuación se dividió el segmento de línea de costa en estudio, en subsegmentos más pequeños dependiendo de si se produce un cambio de orientación de la línea de costa superior a un umbral (Fig. 1). Para cada uno de los subsegmentos más pequeños, se detecta el ángulo de rotación de la costa y se corrige la rotación mediante una transformación lineal. Después de esto, se lleva a cabo un análisis de wavelets (Coco et al., 2005, Torrence y Compo, 1998) utilizando un wavelet complejo de Morlet con frecuencia central de 1,0 y ancho de banda wavelet de 1,5, variando las escalas entre 1 y 1200. Luego, para cada punto de la línea de costa, se ha calculado el espectro de potencia del wavelet en cada una de las longitudes de onda, calculado como el módulo al cuadrado

de la parte real y la parte compleja del wavelet. La longitud de onda máxima se ha limitado a la mitad de la longitud del segmento, ya que valores por encima no tienen sentido para el tema de estudio. Si este valor está por encima de un umbral fijado como mínimo en una de las longitudes de onda del rango de interés (entre 50 y 400 metros), se ha considerado que este punto forma parte de una megacúspide. A continuación, por medio de técnicas de *GIS*, se delimitaron los diferentes subsegmentos y el área geográfica donde hay puntos clasificados como megacúspides, y por lo tanto se considera que hay presencia de megacúspides. Durante la delimitación de estas áreas se ha utilizado el criterio que si diferentes agrupaciones de megacúspides están separadas por menos de un cierto umbral se consideran un único subsegmento. El umbral se ha fijado en 300 m, el doble de la media de las longitudes de onda media de las megacúspides que pueden ocurrir en esta zona (de Swart et al., 2022).

Una vez delimitados los segmentos con presencia de megacúspides en el rango de longitudes de onda de interés, en una segunda fase se ha procedido a la caracterización de megacúspides en cada segmento. Para ello, a la línea de costa correspondiente al segmento de interés, se le aplica una corrección de tendencia con un polinomio de grado 2. Posteriormente se calculó la desviación estándar y la sinuosidad (Ojeda et al., 2011) para evaluar la variabilidad potencial a lo largo de la costa. A continuación, se utiliza un algoritmo de detección de picos, en el que se filtran las oscilaciones con una amplitud inferior a 3 m para evitar la inclusión de ruido. Este valor, idéntico para las líneas de costa fotointerpretadas desde ortofotografía aérea, S2 y PlanetScope, se ha seleccionado entre diferentes valores probados (entre 2 y 5 m) porque proporcionaba un resultado muy robusto en diferentes segmentos de costa. Finalmente, se calculó la longitud de onda a lo largo de la costa como la distancia media entre las crestas de las megacúspides y se determinó la amplitud como la mitad de la distancia media transversal a la costa entre una bahía y sus dos crestas adyacentes.

4. Resultados

La Tabla 1 muestra, para la zona de estudio, el mejor resultado en términos de distancia absoluta media (DAM), error cuadrático medio (ECM), y distancia media (DM) entre las líneas de costas extraídas automáticamente de imágenes S2 y de PlanetScope, y las de referencia. Estos resultados corresponden a la media ponderada de todos los transectos de todas las fechas con líneas de costa de referencia disponibles en esta zona de estudio. Los resultados revelan que se puede obtener una precisión de unos 3,8 metros (en términos de ECM) para S2 y de 1.5 metros para PlanetScope (es decir, precisión subpíxel en ambos casos).

Tabla 1. *Distancia absoluta media (DAM), error cuadrático medio (ECM), distancia media (DM) obtenidos para las tres mejores metodologías (índice y método) utilizando imágenes de S2 y PlanetScope. Los parámetros estadísticos corresponden a todos los puntos de todas las fechas de cada sitio.*

Índice	Método	DAM [m]	ECM [m]	DM [m]	Imágenes
NDWI	GMM	3,78	4,32	-3,32	S2
NIR	k-means	1,49	1,87	-0,19	PlanetScope

El análisis basado en wavelets, para la detección de zonas con presencia de megacúspides, se llevó a cabo para las fechas en las que se disponía tanto de un ortomosaico de alta resolución como de la imagen S2 y PlanetScope más cercana (en un plazo de 3 días). La zona de estudio se dividió en 5 subsegmentos correspondientes a cambios de orientación de la costa (Fig. 1), y el análisis se llevó a cabo en cada uno de ellos para las diferentes fechas. La Figura 2 muestra el espectrograma derivado del análisis de wavelets para el subsegmento 3 de la zona de estudio (3,6 km de longitud), para líneas de costa derivadas de ortomosaicos y de S2 de mayo 2019. La Figura 2 muestra que los dos espectrogramas son muy parecidos, y que el espectro wavelet es máximo alrededor de una longitud de onda de 1km y bastante homogéneo a lo largo de la línea de costa. Por otro lado se pueden observar, tanto para las líneas de costa derivadas de S2 como de los ortomosaicos (de referencia), una zona muy localizada con magnitudes importantes alrededor de 15-20. Estos valores pueden asociarse a la presencia de megacúspides con longitudes de onda comprendidas entre 70 y 230 m (parte inferior derecha en las dos subimágenes). El resultado final de esta fase se puede observar en la figura 3 donde se muestran los puntos de la línea clasificados

como pertenecientes a megacúspides y que se encuentran en dos subsegmentos de aproximadamente 0,8 y 1,4 km (la línea de costa de este ejemplo es de S2).

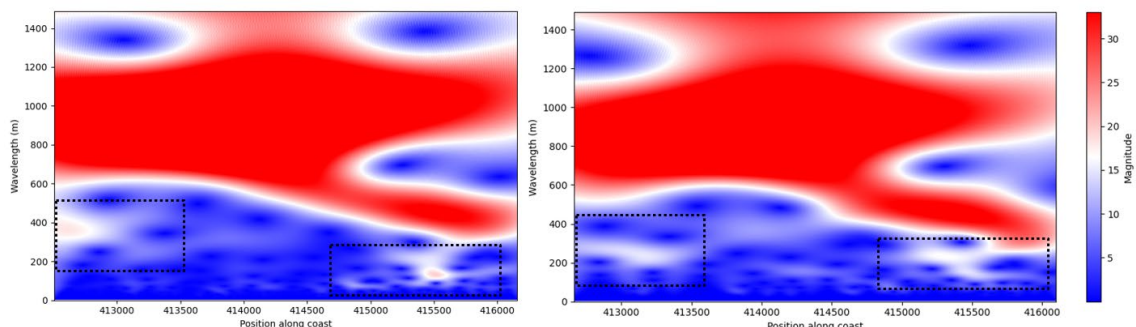


Fig. 2 Espectrogramas wavelet del subsegmento número 3. Espectrogramas obtenidos a partir de las líneas de costa derivadas de ortografía aérea (izquierda) y de S2 (derecha) en mayo 2019. Las áreas con presencia de megacúspides se muestran dentro de los rectángulos negros.



Fig. 3 Ejemplo de subsegmentos delimitados automáticamente y clasificación de los puntos línea de costa. Subsegmentos de 0,8 y 1,4 km (lila y rojo) a partir de los espectrogramas wavelet del subsegmento número 3. Puntos de línea de costa clasificados como megacúspides (naranja) dentro del rango de longitudes de onda de interés, y amarillo los clasificados como no pertenecientes a megacúspide.

Una vez detectado las zonas donde hay presencia de megacúspides, se aplica el proceso de caracterización de megacúspides en uno de estos subsegmentos (de 1,4 km), utilizando la localización automática de picos y valles. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2 utilizando como indicadores la longitud de onda media (LOM), amplitud media (AM), sigma de la posición del subsegmento de línea de costa y sinuosidad del subsegmento de línea de costa.

Tabla 2. Longitud de onda media (LOM), amplitud media (AM), sigma y sinuosidad (S) obtenidas en las imágenes S2 y PlanetScope para un subsegmento de 1,4 km del Delta del Llobregat.

Índice - Método	LOM [m]	MA [m]	sigma	S	Imagen
NDWI - GMM	142,93	10,63	4,4	1,054	S2
NIR - kmeans	142,91	11,07	3,9	1,0154	PlanetScope
Referencia	140,88	11,24	4,2	1,0120	Ortofotografía aérea

5. Discusión y conclusiones

Este trabajo presenta una metodología para detectar y caracterizar megacúspides a partir de líneas de costa obtenidas con sensores remotos, de manera robusta y precisa. Las características de las megacúspides (Tabla 2) detectadas automáticamente en la zona de estudio son coherentes con las observadas en de Swart et al. (2022) a

partir de líneas de costa derivadas de una estación de *video monitoring*. Estos resultados prometedores se ampliarán a partir del análisis que se está llevando a cabo de todas las imágenes S2 y PlanetScope disponibles de la zona de estudio. El uso del análisis de wavelets no es nuevo ya que se ha utilizado, entre otros, para estudiar la interacción entre la línea de costa y las barras de arena (Coco et al., 2005). No obstante, en este trabajo se han utilizado para detectar de manera automática segmentos de costa con presencia de megacúspides, a partir de imágenes satélites multispectrales. La naturaleza automática del análisis lo hace fácilmente aplicable a diferentes casos de estudio y propósitos. Por lo tanto, tiene el potencial de permitir la detección y caracterización de megacúspides en una variedad de localizaciones geográficas y con buenas resoluciones espaciales y temporales. El análisis de wavelet ha revelado en algunas líneas de costa, un posible mecanismo de autorganización de la línea de costa en unas longitudes de onda mayores que las de las megacúspides (alrededor del km). Sin embargo, este resultado es preliminar y requeriría un análisis mucho más extenso y detallado. La metodología propuesta incluye el uso tanto de imágenes S2 como PlanetScope. Esto permitiría, a nivel operacional, utilizar S2 para identificar y caracterizar segmentos de costa donde se desarrollen megacúspides y a su vez identificar eventos significativos. En estos casos, se podría analizar con más detalle la evolución temporal añadiendo las líneas de costa extraídas de las imágenes PlanetScope.

6. Agradecimientos

Los trabajos de E.A y F.d-U reciben fondos de la Generalitat de Catalunya a través de la ayuda 2021SGR00536. Los estudios de F.R están subvencionados por el Gobierno de España a través de las ayudas PID2021-124272OB-C22 y TED2021-130321B-I00 (MINECO/FEDER).

7. Referencias

- Angelini, R., Angelats, E., Luzi, G., Ribas, F., & Masiero, A., 2024. Shoreline Extraction Methods from Sentinel-2 and PlanetScope Images, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, XLVIII-1-2024, 1–6. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-1-2024>, 2024
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K.D., Robinet, A., Sénéchal, N. & Ferreira, S., 2015. Impact of the winter 2013–2014 series of severe Western Europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology* 238, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.006>
- Coco G., Bryan K.R., Green M.O., Ruessink B.G., Turner I.L. & Van Enkevort I.M.J., 2005, Video Observations of Shoreline and Sandbar Coupled Dynamics, *Proceedings of Coasts and Ports*.
- de Swart, R.L., Ribas, F., Calvete, D., Simarro, G. & Guillén, J., 2022. Observations of megacusp dynamics and their coupling with crescentic bars at an open, fetch-limited beach. *Earth Surface Processes and Landforms.* 47, 3180–3198. <https://doi.org/10.1002/esp.5451>
- Doherty, Y., Harley, M. D., Vos, K. & Splinter, K. D., 2022. A Python toolkit to monitor sandy shoreline change using high-resolution PlanetScope cubesats. *Environmental Modelling and Software.* 157, 105512. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105512>
- Ojeda, E., Guillén, J. & Ribas, F., 2011. Dynamics of single-barred embayed beaches. *Marine Geology.* 280, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.12.002>
- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Fernández-Sarría, A., Armaroli, C., Ciavola, P., Montes, J., Souto-Cecon, P.E. & Palomar-Vázquez, J., 2023. Assessment of Satellite-Derived Shorelines Automatically Extracted from Sentinel-2 Imagery Using SAET. *Coastal Engineering.* <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104426>

- Torrence, C. & Compo, G.P. , 1998. A practical guide to wavelet analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, 61-78.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079%3C0061:APGTWA%3E2.0.CO;2)
- Vos, K., Splinter, K.D., Palomar-Vázquez, J., Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Cabezas-Rabadán, C., Kras, E.C., Lujendijk, A.P., Calkoen, F., Almeida, L.P., Pais, D., Klein, A.H.F., Mao, Y., Harris, D., Castle, B., Buscombe, D. & Vitousek, S., 2023. Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth & Environment* 4. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2>