

Resumen

Las playas son ambientes ecológicos sumamente valiosos donde a lo largo de una frágil franja de transición converge el entorno terrestre y el medio marino. Durante el último siglo, el desarrollo de la industria turística ha convertido estos espacios costeros en un recurso social y económico prácticamente a escala global. Desde entonces y cada vez más, la mejora en la comprensión de los procesos físicos que ocurren en la zona costera es un asunto de máxima importancia. Para abordar una planificación coherente de la gestión costera se requiere tomar en consideración el dinamismo de los diferentes cambios morfológicos que caracterizan estos ambientes. Por ello, conocer y cuantificar las tendencias evolutivas costeras es esencial para comprender la complejidad de los fenómenos que allí se producen a distintas escalas espaciales y temporales. Diversos análisis evolutivos, y con un grado apropiado de precisión, permitirán detallar el tipo de cambio, reconocer sus factores condicionantes, y evaluar sus consecuencias ambientales y socioeconómicas.

El límite tierra-agua varía en función de la posición del nivel del mar y de la forma del perfil de playa que continuamente queda modelado por las olas incidentes. Intentar modelizar la respuesta de un paisaje tan voluble geomorfológicamente como las playas requiere disponer de múltiples medidas registradas con suficiente precisión para poder reconocer su respuesta frente a la acción de los distintos agentes geomórficos. Para ello resulta esencial disponer de diferentes sistemas de monitorización capaces de registrar de forma sistemática la línea de costa con exactitud y efectividad. Se requieren nuevos métodos y herramientas informáticas que permitan capturar, caracterizar y analizar eficientemente la información con el objeto de obtener indicadores con significación geomorfológica de calidad. En esto radica el objetivo de la presente tesis doctoral, centrándose en el desarrollo de herramientas y procedimientos eficientes para la monitorización costera mediante el uso de imágenes satelitales y fotografías terrestres.

Por un lado, se describen las ecuaciones y el proceso de implementación de una nueva metodología fotogramétrica versátil denominada C-Pro (Coastal Projector). Con ella se podrán georreferenciar imágenes provenientes de cualquier sistema de video monitorización salvando los rígidos requerimientos fotogramétricos que muchos de estos conocidos sistemas exigen para funcionar. El riguroso proceso de resección espacial de la cámara se logra incluyendo en el sistema de colinealidad la condición geométrica de la línea del horizonte, para posteriormente realizar la proyección de la imagen sobre un plano georreferenciado (RMSE inferior a 1,54 m estimado para las imágenes

georectificadas). La inclusión de estas ecuaciones en el sistema ofrece seguridad y un margen mayor de actuación referente a los grados de libertad del ajuste y en función de los parámetros a estimar. La exactitud de C-Pro se evalúa en diferentes playas, comparando la línea de costa obtenida frente a otras líneas medidas simultáneamente con instrumental más preciso como el GPS-RTK. El error medio obtenido y su desviación típica es de $0,15 \pm 1,05$ m.

Otros objetivos particulares se derivan del trabajo fotogramétrico, analizando nuevos métodos y soluciones procedimentales para obtener información de playas a partir de fotos terrestres. Inicialmente se presenta el modo de proceder con C-Pro para convertir imágenes de videocámaras recreativas en datos costeros cuantitativos de gran utilidad para extraer las características hidrodinámicas del oleaje incidente en una playa concreta y hacer frente a estudios morfodinámicos. También se investiga y propone una solución metodológica que formaliza un proyecto de monitorización costera mediante participación ciudadana. Haciendo frente a los desafíos propios de trabajar con fotos adquiridas con diferentes teléfonos móviles, los resultados obtenidos fielmente reconstruyen los cambios sedimentarios acaecidos en las playas analizadas (RMSE inferior a 1,4 m en campo cercano, y oscilando entre 2,6 y 3,9 m en tramos costeros de hasta 1 km de longitud). Otras técnicas de procesamiento de imagen son analizadas para obtener información 3D de la zona intermareal de la playa.

Por otro lado, se muestra la evaluación y mejora de diferentes procedimientos metodológicos que logran obtener eficientemente la línea de costa con precisión sub-píxel, a partir de imágenes de satélite de media resolución. Conseguir superar la limitación de la resolución espacial (20-30 m) que presentan las imágenes capturadas por los satélites Landsat (5, 7 y 8) y Sentinel 2 abrirá, sin lugar a dudas, un nuevo escenario que permitirá utilizar esta ingente base de datos de imágenes gratuitas y disponibles a nivel mundial para múltiples estudios y a diferentes escalas –según la magnitud del fenómeno o el cambio a analizar. Respecto a la monitorización costera, todas las evaluaciones realizadas parten de preguntarse si la línea de costa deducida de las imágenes satelitales sobre una playa natural es o no coincidente con la línea de agua que pueda ser medida en campo o identificada en una fotografía de mayor resolución. Es en este punto donde la sinergia con la herramienta fotogramétrica C-Pro ha permitido una evaluación rigurosa de la metodología de extracción sub-píxel (descrita en trabajos anteriores por el mismo grupo de investigación en el que se desarrolla esta tesis doctoral), y la consecuente implementación de mejoras para subsanar las debilidades encontradas.

Una de ellas se deriva de la significativa afección que supone para el algoritmo la localización de la línea de costa a nivel píxel utilizada como aproximación inicial. Para resolver este problema se presenta una solución

algorítmica nueva que, a diferencia de la solución anterior, busca la detección de la línea de costa sub-píxel mediante el ajuste de una función polinómica bidimensional definida sobre un soporte de píxeles adaptable al tipo de cambio radiométrico de la imagen. La evaluación de las precisiones con esta nueva metodología evidencia una clara mejora frente a la solución original. Asimismo, disponer de decenas de líneas de costa derivadas de video monitorización como datos precisos de referencia, y gracias a disponer de C-Pro, ha permitido testear la solución algorítmica tradicional mediante la aplicación de diferentes parámetros – modificando el tamaño del vecindario de análisis, el grado de ajuste del polinomio o el rango espectral de la imagen analizada. Con esto se ha podido definir una solución óptima de aplicación con resultados sustancialmente más precisos (3,57 m y 3,01 m para Landsat 8 y Sentinel 2 respectivamente) que los descritos hasta ahora. Una vez hallada una solución óptima, sobre esta base algorítmica se propone un protocolo de actuación –desarrollado dentro de un sistema completo que se denomina SHOREX (Shoreline Extraction)– el cual está en disposición de extraer automáticamente líneas de costa de forma masiva, asegurando así la operatividad de los procesos desarrollados.

El presente trabajo aporta soluciones de procesamiento de imágenes de satélite y fotogramétricas a científicos, ingenieros y gestores costeros, proporcionando resultados que evidencian la gran utilidad de estas técnicas viables y de bajo coste para la monitorización costera. Mediante ellas se puede convertir información pública existente y de libre acceso (imágenes satelitales, datos de video cámaras o fotografías de la ciudadanía) en datos de alta calidad para el monitoreo de los cambios morfológicos de las playas, y lograr así una consiguiente gestión sostenible de los recursos costeros.