

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO,
EXPLOTACIÓN Y DIFUSIÓN DE LÍNEAS DE COSTA
Y TASAS DE EROSIÓN A MEDIO-LARGO PLAZO
(1956-2011) EN ANDALUCÍA

TESIS DOCTORAL
Antonio Prieto Campos





UNIVERSIDAD DE SEVILLA
FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA FÍSICA Y
ANÁLISIS GEOGRÁFICO REGIONAL

PROGRAMA DE DOCTORADO DE GEOGRAFÍA

***METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO, EXPLOTACIÓN
Y DIFUSIÓN DE LÍNEAS DE COSTA Y TASAS DE EROSIÓN
A MEDIO-LARGO PLAZO (1956-2011) EN ANDALUCÍA***

TESIS DOCTORAL

Doctorando: Antonio Prieto Campos

Directores: José Ojeda Zújar

María del Pilar Díaz Cuevas

Sevilla, abril de 2017

AGRADECIMIENTOS

Durante toda esta etapa como doctorando, son tantas las personas a las que debo agradecer su ayuda y apoyo (tanto profesional como personal) que se me torna complicado expresarlo en unas cuantas líneas.

En primer lugar, agradezco enormemente a mis directores, Dr. D. José Ojeda Zújar y Dra. Dña. María del Pilar Díaz Cuevas, la confianza depositada en mí y en mi trabajo durante todo este tiempo, para los cuales no tengo palabras de agradecimiento suficientes y sin los cuales hubiese sido imposible la realización de este trabajo. Por vuestra dedicación y esfuerzo, por vuestras correcciones y por las innumerables horas de reunión en vuestros despachos. Por vuestra amabilidad, por vuestra empatía y comprensión, y sobre todo, por vuestro conocimiento y experiencia, sólo superado por vuestra calidad y bondad como personas. Por todo ello, os tengo como compañeros y no como directores. Por todo ello, de corazón, muchas gracias.

A la Universidad de Sevilla, por poner a mi disposición los recursos económicos necesarios para la elaboración del presente trabajo.

Al Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional de la Universidad de Sevilla y, en concreto, a los componentes del Grupo de Investigación “Ordenación del Litoral y Tecnologías de Información Territorial”, por acogerme como un miembro más del equipo y por permitir alimentarme de vuestro conocimiento. Muchos de vosotros os habéis convertido en amigos después de tanto tiempo juntos, y el que nos queda.

Al “Zulo” y “New Zulo” de Geografía, a los que están y los que estuvieron, por ese ambiente envidiable de trabajo y compañerismo que se respira con vosotros. Por nuestros momentos de silencio, por nuestros momentos de risa, por ese “momento gallinero” que se forma cuando nos visita algún antiguo compañero, por nuestras cervezas extraoficiales, por esa I edición del Campeonato de Fútbol 7 de PAS/PDI que ganamos y por el asa que queda de la copa. A Pablo, Arsenio, Migue, Miriam, Gabi, Juanma, Inma, Xavi, Eloy...gracias por hacer este camino más fácil y divertido. Por la amistad que se ha forjado durante todo este tiempo, gracias.

A Jose, por tus incontables horas delante de la pantalla para tener a punto el geovisor web y la infinidad de funcionalidades de la herramienta para especialistas. Por tu “buen humor” y “simpatía”, pero sobre todo, por el compañerismo que nos une. Parte de esta Tesis lleva tu nombre. Muchas gracias.

A Estrella, mi “Estre”, por tu vitalidad y tu risa contagiosa. Por tus ánimos en la fase terminal de redacción y corrección, así como tu ayuda para la elaboración de la portada. Gracias.

A mis amigos de toda la vida, a los que siempre habéis estado y estaréis para todo. A Óscar, Jose, Román, Rafa, More, Bonilla, Lara, Compán, Diego y otros tantos que dejo en el tintero, por soportar mi ausencia y aún así, seguir ahí. Muchas gracias.

A mi familia, por su enorme apoyo moral, en especial a mi tío Rafael y su “ya te queda menos” que, a veces, me alentaba aunque no se lo dijera. Gracias.

Por último, a mis padres, por vuestro duro trabajo y por confiar en mí y mis posibilidades desde que dije “quiero ser geógrafo”, sobre todo a ti, mamá, por ser mi pilar de apoyo durante esta fase final. Tu fuerza ha sido mi principal fuente de inspiración para acabar este trabajo. Te lo debo todo. De todo corazón, muchas gracias.

RESUMEN

La Tesis desarrollada tiene como objetivo general *“realizar una propuesta metodológica para **el cálculo y análisis de las tasas de erosión** a medio/largo plazo (1956-2011) en las playas expuestas de toda la costa de Andalucía, asociadas a un **modelo de datos** implementado en una **base de datos espacial** que permita, además, **su explotación temática, el cálculo de indicadores y la difusión web**”*. La propuesta metodológica para el cálculo de las tasas de erosión se basa en la utilización de 2 *“proxies”* de línea de costa, que son foto-interpretados a escala 1:2.500 por el autor sobre las ortofotografías de 1956, 1977, 2001 y 2011. La utilización del software *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* ha permitido extraer las **tasas de erosión** para 1 periodo global (1956-2011) y 4 periodos intermedios (1956-1977, 1977-2001, 2001-2011 y 1977-2011), así como su posterior incorporación a una **base de datos espacial (PostgreSQL/PostGIS)** donde se integran junto a un **conjunto adicional de información temática** (tipologías de playas, presencia de infraestructuras, proximidad de elementos urbanos, etc.). Esta base de datos espacial constituye el núcleo central de proceso metodológico y el primer resultado de la Tesis. En este contexto, se utilizan las relaciones entre tablas y entidades de la base de datos para extraer un nuevo conjunto de **indicadores temáticos de interés territorial, ambiental y turístico** (playa útil como capacidad de carga turística, porcentaje de sectores erosivos a nivel municipal, etc.).

El cálculo y posterior análisis de las tasas, del que no existen precedentes para la totalidad de la costa de Andalucía (917 Km.), revela el predominio de los sectores erosivos en la totalidad de los periodos analizados, así como el efecto de la presencia de infraestructuras y urbanización en playas y dunas costeras en muchos tramos, elevando su vulnerabilidad. Otro resultado singular e innovador responde a la estrategia de difusión de resultados seguida, ya que adicionalmente a los medios tradicionales (mapas de tasas de erosión), se ha apostado por la publicación de **servicios web interoperables OGC (WMS, WMTS, WFS)** y el desarrollo de un **geovisor web** que tiene capacidades de **geovisualización multiescalar de los datos, resultados e indicadores** y viene a suplir la imposibilidad de difundir los resultados de la Tesis por los medios tradicionales debido a la escala de trabajo (1:2.500). La herramienta desarrollada en este geovisor web para la **exploración “on line” de los datos resultados originales** (generación de gráficos, cálculos de indicadores a demanda, etc.) por parte de especialistas constituye otro resultado innovador de esta Tesis Doctoral.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTOS GENERALES **1**

1.1.- JUSTIFICACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN	1
1.2.- HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS	6
1.2.1.- HIPÓTESIS DE PARTIDA	6
1.2.2.- OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	8
1.3.- ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL	10
1.4.- ÁMBITO DE ESTUDIO	13
1.4.1.- DESCRIPCIÓN GENERAL	13
1.4.2.- LA COSTA DE ANDALUCÍA	16
1.4.2.1.- VERTIENTE ATLÁNTICA	22
1.4.2.2.- VERTIENTE MEDITERRÁNEA	26
1.4.3.- LAS PLAYAS EXPUESTAS DE ANDALUCÍA	30
1.4.4.- UNIDADES FISIográfICAS Y TRAMOS	36

CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN **39**

2.1.- EROSIÓN COSTERA Y PLAYAS EXPUESTAS: TERMINOLOGÍA, PROCESOS Y DINÁMICA	39
2.1.1.- EROSIÓN COSTERA Y PLAYAS EXPUESTAS	39
2.1.2.- TÉRMINOS GEOMORFOLÓGICOS E HIDRODINÁMICOS PARA LA DEFINICIÓN DE LAS PLAYAS EXPUESTAS	42
2.1.3.- PROCESOS Y DINÁMICA EN LAS PLAYAS EXPUESTAS	45
2.2.- CAUSAS DE LA EROSIÓN DE PLAYAS: ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES	50
2.2.1.- CONTEXTO GEOLÓGICO: CAUSAS Y FACTORES DE LAS OSCILACIONES DE LA LÍNEA DE COSTA	50
2.2.2.- CAUSAS Y FACTORES DE LA EROSIÓN DE LAS PLAYAS DE ANDALUCÍA EN EL PERÍODO DE ANÁLISIS (1956-2001)	53
1.2.2.1.- NIVEL MEDIO DEL MAR Y NIVEL RELATIVO DEL MAR	53
1.2.2.2.- CAMBIOS EN EL CLIMA MARÍTIMO: OLEAJE Y MAREA	58
1.2.2.3.- CAMBIOS EN EL BALANCE SEDIMENTARIO Y ALTERACIONES ANTRÓPICAS	60
2.2.3.- ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN DE LAS PLAYAS DE ANDALUCÍA EN EL PERÍODO DE ANÁLISIS	63
2.3.- ANTECEDENTES, FUENTES Y METODOLOGÍAS DE CÁLCULO	65
2.3.1.- CONSIDERACIONES SOBRE LA MEDICIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN LAS PLAYAS EXPUESTAS	65
2.3.2.- DISPONIBILIDAD DE FUENTES DE INFORMACIÓN. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS DE MEDICIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN LAS PLAYAS EXPUESTAS	67
2.3.2.1.- CARTOGRAFÍA HISTÓRICA	69

2.3.2.2.- LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO / GPS	71
2.3.2.3.- IMÁGENES DE SATÉLITE	73
2.3.2.4.- <i>LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)</i>	75
2.3.2.5.- VUELO FOTOGRAFÉMTRICO	77
2.3.3.- EXPERIENCIAS DERIVADAS DEL USO DE LOS PRODUCTOS DEL VUELO FOTOGRAFÉMTRICO EN ANDALUCÍA	81
2.4.- EXPERIENCIAS SOBRE EL USO DE GEOVISORES WEB PARA LA DIFUSIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN	85
2.4.1.- EL USO DE VISORES WEB PARA LA DIFUSIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN	88
2.4.2.- EXPERIENCIAS DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL DESARROLLO DE GEOVISORES WEB	95
2.5.- CONSIDERACIONES FINALES	99
<u>CAPÍTULO 3. FUENTES DE DATOS Y METODOLOGÍA</u>	105
3.1.- FUENTES	107
3.1.1.- INTRODUCCIÓN. PRODUCTOS DERIVADOS DE UN VUELO FOTOGRAFÉMTRICO	107
3.1.1.1.- FOTOGRAMA	108
3.1.1.2.- ORTOFOTOGRAFÍA	111
3.1.1.3.- SERVICIO INTEROPERABLE	113
3.1.2.- FUENTES PRINCIPALES: VUELOS Y ORTOFOTOGRAFÍAS UTILIZADOS	115
3.1.3.- FUENTES COMPLEMENTARIAS	125
3.2.- CRITERIOS DE FOTOINTERPRETACIÓN Y LEVANTAMIENTO DE DATOS	129
3.2.1.- CRITERIOS DE FOTOINTERPRETACIÓN	129
3.2.2.- ESCALA DE DIGITALIZACIÓN	132
3.2.3.- ERRORES GEOMÉTRICOS EN EL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN Y FOTOINTERPRETACIÓN	133
3.2.4.- LEVANTAMIENTO DE DATOS	137
3.2.4.1.- MARCO DE TRABAJO Y CONTROL DE CALIDAD INICIAL	137
3.2.4.2.- DIGITALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE COSTA	138
3.2.4.3.- CONTROL DE CALIDAD FINAL	141
3.3.- MODELO DE DATOS	143
3.4.- METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE TASAS DE EROSIÓN E INDICADORES TEMÁTICOS	148
3.4.1.- CÁLCULO DE TASAS DE EROSIÓN	148
3.4.1.1.- ANÁLISIS CUANTITATIVO (<i>DSAS</i>)	148
3.4.1.2.- MÉTODOS DE CÁLCULO	151
3.4.1.3.- PERÍODOS DE CÁLCULO	152

3.4.2.- CÁLCULO DE INDICADORES TEMÁTICOS	153
3.4.2.1.- INDICADORES DE CÁLCULO GEOMÉTRICO	154
3.4.2.2.- INDICADORES DE INTERÉS PARA LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA	155
3.4.2.3.- ÍNDICES SINTÉTICOS COMPLEJOS	157
3.4.3.- INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL MODELO DE DATOS	159
3.5.- TRATAMIENTO SEMIOLÓGICO DE LOS RESULTADOS	161
3.5.1.- REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS	161
3.5.2.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS	162
3.5.3.- GENERALIZACIÓN DE RESULTADOS	163
3.6.- ACCESO Y DIFUSION DE LOS RESULTADOS EN INTERNET. SERVICIOS OGC Y GEOVISOR WEB	165
3.6.1.- GENERACIÓN DE SERVICIOS INTEROPERABLES	166
3.6.2.- GEOVISOR GENERALISTA (PROTOTIPO <i>GIS AND COAST</i>)	167
3.6.3.- HERRAMIENTA PARA ESPECIALISTAS: CONSTRUCTOR DE FILTROS CQL	171

CAPÍTULO 4. RESULTADOS **175**

4.1.- ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS ESPACIAL	176
4.1.1.- ESTRUCTURA Y RELACIONES DE LAS TABLAS DERIVADAS DE LA FOTOINTERPRETACIÓN Y LEVANTAMIENTO DE DATOS: LÍNEAS DE COSTA	177
4.1.2.- ESTRUCTURA, ENTIDADES, TABLAS Y RELACIONES DERIVADAS DEL CÁLCULO DE TASAS Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA: TRANSECTOS	180
4.1.2.1.- ESTRUCTURA, ENTIDADES, TABLAS Y RELACIONES DERIVADAS DEL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE TASAS	181
4.1.2.2.- ESTRUCTURA, ENTIDADES, TABLAS Y RELACIONES GENERADAS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS	183
4.2.- RESULTADOS VINCULADOS AL ANÁLISIS DE LAS TASAS DE EROSIÓN	185
4.2.1.- SOBRE LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	185
4.2.2.- PRESENTACIÓN Y VALORACIÓN GLOBAL DE LAS TASAS DE EROSIÓN PARA LA COSTA DE ANDALUCÍA	191
4.2.2.1.- PERÍODO DE REFERENCIA 1977-2011	191
4.2.2.2.- COMPARACIÓN CON EL PERÍODO HISTÓRICO (1956-1977)	195
4.2.2.3.- COMPARACIÓN CON LA EVOLUCIÓN RECIENTE (1977-2001 Y 2001-2011)	199
4.2.3.- TRAMO 1: RÍO GUADIANA-PUERTO DE CHIPIONA	205
4.2.3.1.- LÍMITES, EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA RECIENTE Y BALANCE SEDIMENTARIO	205
4.2.3.2.- ALTERACIONES ANTRÓPICAS	209
4.2.3.3.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN	214
4.2.4.- TRAMO 5: CASTELL DE FERRO-CABO DE GATA	229

4.2.4.1.- LÍMITES, EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA RECIENTE Y BALANCE SEDIMENTARIO	229
4.2.4.2.- ALTERACIONES ANTRÓPICAS	234
4.2.4.3.- ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN	238
4.3.- RESULTADOS DE LA EXPLOTACIÓN DE INDICADORES TEMÁTICOS	257
4.3.1.- INDICADORES DE CÁLCULO GEOMÉTRICO	257
4.3.2.- INDICADORES DE INTERÉS PARA LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA	258
4.3.3.- ÍNDICES SINTÉTICOS COMPLEJOS	262
4.4.- RESULTADOS DE LA DIFUSIÓN WEB	266
4.4.1.- SERVICIOS INTEROPERABLES <i>OGC</i>	266
4.4.2.- GEOVISOR WEB	274

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS **283**

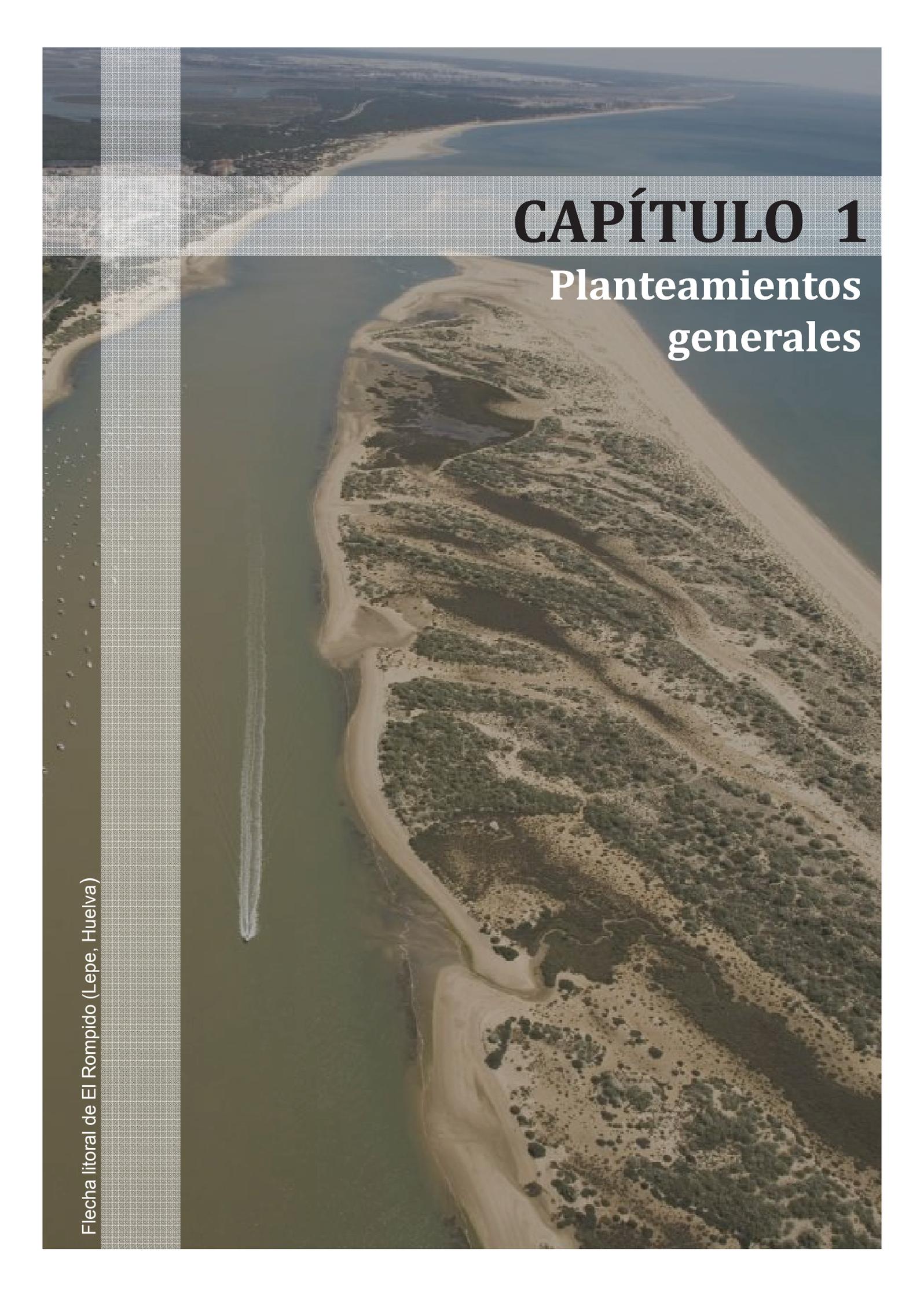
5.1.- CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	283
5.1.1.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 1	283
5.1.2.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 2	286
5.1.3.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 3	287
5.1.4.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 4	298
5.1.5.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 5	299
5.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	302

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **307**

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ANEXOS CARTOGRÁFICOS

An aerial photograph of a coastal lagoon system. A long, narrow sand spit extends from the top left towards the bottom right, separating a large lagoon from the open sea. The lagoon water is a light, milky brown color, while the sea is a deep blue. The land is covered with sparse, low-lying vegetation and sandy areas. The sky is clear and blue.

CAPÍTULO 1

Planteamientos generales

Flecha litoral de El Rompido (Lepe, Huelva)

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTOS GENERALES

1.1.- JUSTIFICACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

El autor del presente trabajo de investigación finalizó sus estudios correspondientes a la Licenciatura de Geografía en 2008, obteniendo el Premio Extraordinario Fin de Carrera para dicha promoción. Su actividad investigadora se desarrolla en el Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional de la Universidad de Sevilla, iniciándose su adscripción a éste en enero de 2009 durante el período en prácticas de la *V Edición del Máster Propio de Sistemas de Información Geográfica: planificación, ordenación territorial y medio ambiente* que, junto a la labor desarrollada en el proyecto “*Desarrollo del Subsistema de Información del Litoral y Medio Marino*” hasta enero de 2010, supusieron la primera toma de contacto profesional con los Sistemas de Información Geográfica y con la geomorfología litoral.

La obtención de una beca predoctoral correspondiente al IV Plan Propio de Investigación de la Universidad de Sevilla (2011-2014) y la realización del *Máster Universitario en Ordenación y Gestión del Desarrollo Territorial y Local* constituyen el antecedente más directo de la presente Tesis Doctoral. El Trabajo Fin de Máster realizado para la obtención de la suficiencia investigadora, denominado “*Propuesta metodológica para el cálculo de tasas de erosión aplicada a los deltas mediterráneos andaluces (1956-2009)*” y presentado en diciembre de 2012, representó un primer

contacto directo con las bases metodológicas y el análisis de los procesos evolutivos litorales que se desarrollan en la presente Tesis Doctoral, revelando la adecuación de parte de las estrategias utilizadas en el mismo a los objetivos que se desarrollarán en la Tesis.

Como miembro del Grupo de Investigación “Ordenación del Litoral y Tecnologías de Información Territorial” (RNM-177), el autor ha completado su labor investigadora con su participación en los proyectos “*Actualización de Información Integrada en el Subsistema del Litoral y el Medio Marino de la Red de Información Ambiental de Andalucía*” y “*Análisis y desarrollo de protocolos de acceso y explotación de la información de interés para el Subsistema Litoral y Medio Marino integrada en la Red de Información Ambiental de Andalucía*”, todos ellos financiados por la Consejería de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Ello ha permitido al autor de la presente investigación adquirir conocimiento experto sobre fotointerpretación, digitalización y análisis de la dinámica costera, formación que también se revelará esencial en esta Tesis. Resultado de este conocimiento adquirido son las diversas publicaciones correspondientes a congresos y revistas nacionales e internacionales sobre línea de costa, tasas de erosión y otras temáticas afines (Ojeda et al., 2010, 2013, 2015a, 2015b; Díaz et al., 2012, 2013, 2014; Prieto et al., 2012; Fernández et al. 2015). De los trabajos descritos se deriva la importancia de la erosión en las playas y sus consecuencias en el deterioro de un recurso natural, ambiental y económico de primera índole en la comunidad autónoma de Andalucía.

Estos proyectos exigían de la delimitación y digitalización a escala detallada para diferentes fechas de la línea de costa para la totalidad del litoral andaluz (917 Km.), con la selección de un método y la utilización de unas fuentes que permitiesen el seguimiento periódico y comparable, siendo la fotointerpretación a través de ortofotografías y ortoimágenes el método y las fuentes más adecuadas para ello. La experiencia dilatada del Grupo de Investigación a través de dichos proyectos ha revelado carencias y necesidades en los trabajos previos (estudios con diferentes criterios de fotointerpretación, diferentes fuentes, escasa representación cartográfica a nivel de detalle de los resultados, etc.) que imposibilitaban una visión de conjunto de la erosión para la totalidad de las playas de Andalucía y que, como se verá más adelante, han marcado metodológicamente la estructura y objetivos de esta Tesis. Por ello, la justificación del presente estudio radica en la necesidad de realizar una propuesta metodológica para la cuantificación de las oscilaciones de la línea de costa (tasas de

erosión) en períodos históricos recientes (1956-2011) que fuese, rigurosa geométricamente a escalas de detalle y comparable en todos los sectores de playas expuestas de Andalucía.

Desde el punto de vista del ámbito de estudio, una de las principales características de la presente Tesis doctoral, no encontradas en trabajos previos afines, será la inclusión, a escala de detalle de 1:2.500, de la totalidad del litoral de la Comunidad Autónoma de Andalucía (917 Km. de estudio) como ámbito de estudio, cuya ordenación y gestión se rige mediante la *Ley 22/1988, de 28 de julio, de costas*¹, modificada mediante la *Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral*², donde se definen los ámbitos del dominio público marítimo-terrestre y demás servidumbres legales. El ámbito litoral de regulación de la presente ley incluye todas aquellas áreas afectadas por algún tipo de influencia marina, desde la “zona de influencia” hasta las “aguas interiores” y “mar territorial”, definiendo conceptos como “ribera del mar”, “zona de tránsito” o “zona de servidumbre de protección”. Por vez primera se incluyen valoraciones especiales como los “terrenos en situación de regresión grave” cuya identificación es absolutamente necesaria, puesto que implica el cumplimiento riguroso de determinados derechos de ocupación, protección, conservación y restauración. Esta novedosa incorporación a la nueva “Ley de Costas de 2013” (la identificación de “terrenos en situación de regresión grave”), también ha constituido un aliciente adicional por el potencial uso que tendrían los resultados de la Tesis.

Desde el punto de vista metodológico, la necesidad de una digitalización detallada para diferentes períodos de la línea de costa justificaba el uso de ortofotografías y ortoimágenes como fuente de datos principal para garantizar la coherencia geométrica requerida. En el mismo sentido, se detectó que el proceso de levantamiento, interpretación y digitalización de las líneas de costa necesarias para el cálculo de las tasas de erosión debía ser realizado por un solo fotointérprete para todo el área de estudio, con el fin de garantizar un criterio homogéneo sólido que posibilite una

¹ *Ley 22/1988, de 28 de julio, de costas*. Disposición 18762 del Boletín Oficial del Estado, nº 181. Viernes, 29 de julio de 1988. Pp. 23386-23401. Modificada.

² *Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas*. Disposición 5670 del Boletín Oficial del Estado, nº 129. Jueves, 30 de mayo de 2013. Pp. 40691-40736.

comparación fiable de los resultados obtenidos, siendo ésta otra de las singularidades de esta Tesis Doctoral. Por otra parte, la amplitud del intervalo de estudio en la misma (55 años) permitirá, a su vez, detectar tendencias de los procesos erosivos a escala regional por las garantías de comparabilidad de los cálculos que se derivan de la metodología utilizada. Por último, el análisis por subperíodos temporales dentro del intervalo principal de estudio permitía detectar tendencias evolutivas pasadas y actuales de diversos sectores costeros, indetectables desde el punto de vista temporal y espacial mediante el análisis exclusivo del período global (1956-2011).

En otro orden de cosas, los cálculos de tasas basados en la geometría de líneas de costa pasadas se completa, también de forma novedosa, con información alfanumérica de carácter temático siguiendo la estructura planteada en un modelo de datos previamente desarrollado por el Grupo de Investigación que es adaptado y mejorado en esta Tesis. Este hecho constituye otra de las características singulares de esta Tesis Doctoral y permite ampliar los posibles usos potenciales de los resultados de esta Tesis al permitir extraer indicadores temáticos de la combinación cálculos de tasas/información temática, los cuales han sido la base de otros proyectos de investigación en los que el autor ha participado y participa activamente (Proyecto CSO2010-15807 del Plan Nacional de Investigación *“Espacialización y difusión web de variables demográficas, turísticas y ambientales para la evaluación de la vulnerabilidad asociada a la erosión de playas en la costa andaluza”* y Proyecto CSO2014-51994-P del Plan Nacional de Investigación *“Espacialización y difusión web a escalas de detalle de indicadores de vulnerabilidad de las playas de Andalucía como recurso turístico ante los procesos erosivos”*).

Desde el punto de vista de la difusión de los resultados se ha intentado proporcionar a éste un valor equivalente al del propio cálculo de los mismos. Por ello, en la estrategia de difusión se ha enfatizado el correcto tratamiento semiológico de los resultados en su representación cartográfica, especialmente en su difusión a través de Internet (*web mapping*). En este sentido, se ha intentado seguir los estándares que se proponen desde el marco legislativo europeo en la Directiva *INSPIRE*³, la cual requiere que las organizaciones responsables de la información geográfica ofrezcan su información de forma integrada y gratuita través de servicios web interoperables. La

³ Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2007, por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea (*INSPIRE*). Diario Oficial de la Unión Europea, nº 108. Miércoles, 25 de abril de 2007. Pp. 1-14.

cantidad de datos producidos y de resultados obtenidos imposibilitaban, por otra parte, su difusión en el clásico formato analógico (anexos cartográficos), por lo que, siguiendo los estándares *Open Geospatial Consortium (OGC)*, los resultados se publicarán en primer lugar como servicios *Web Map Service (WMS)* facilitándose, por lo tanto, el acceso gratuito y su reutilización por todos aquellos usuarios finales (instituciones y particulares) con capacidades técnicas para el consumo de estos servicios web. Adicionalmente, se optó por dar un paso más para garantizar el acceso a los resultados a usuarios más generalistas, para lo que se ha desarrollado un geovisor web que se alimenta de los servicios interoperables antes citados y que permite el acceso a los mismos en una sencilla interfaz de forma intuitiva y amigable, proporcionando además la geovisualización multiescalar de los resultados, una necesidad contemplada desde el inicio desde la perspectiva metodológica. En cierta medida, la información adicional (*pdf* metodológicos, gráficos...) a la que permite acceder el geovisor web lo convierte en el mejor sustituto del anexo cartográfico clásico, permitiendo además explorar los datos y resultados de una forma detallada como requieren los especialistas y científicos.

Los resultados (tasas, indicadores, geovisor) tienen finalmente una clara componente aplicada en diferentes sectores. Un caso claro es el turismo, un sector en alza durante las últimas décadas y motor económico de las regiones ribereñas y, particularmente, de la costa andaluza que se ve seriamente amenazado ante el cambio climático y la cada vez más constatada subida del nivel medio del mar (Fraile, 2011), con efectos directos sobre los procesos de erosión en el litoral. Este problema se ve incrementado exponencialmente por la creciente presión antrópica sobre el espacio costero. La interceptación de sedimentos fluviales, la ocupación de reservas sedimentarias litorales y la alteración del tránsito sedimentario mediante la construcción de infraestructuras en el frente litoral suponen, hoy en día, una de las principales causas de la pérdida del recurso “playa útil” desde la perspectiva turística.

Por todo ello, el presente trabajo podría suponer también una contribución de gran importancia, por una parte, para la Administración (a escala nacional, regional y local), dada la suma importancia que ésta otorga a la ordenación y gestión del litoral como herramienta de prevención y de mitigación de los procesos erosivos, con indiscutibles repercusiones sociales y económicas; y por otra, para la comunidad científica y técnica en general, al poner a su disposición los resultados de los análisis evolutivos del litoral siguiendo criterios homogéneos a gran escala para toda la Comunidad Autónoma de Andalucía, condiciones que, a día de hoy, no se habían abordado en estudios previos.

1.2.- HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS

De todo lo comentado en el epígrafe anterior se derivó la necesidad poner en marcha una metodología que posibilitase la cuantificación de la erosión de las playas andaluzas a medio-largo plazo, pero que además **permitiera** posteriormente la difusión y reutilización de los resultados por otros investigadores y técnicos interesados en los procesos de erosión en las playas expuestas de Andalucía. Para la definición de esta propuesta metodológica se parte de un conjunto de **hipótesis de partida**, derivadas de la experiencia acumulada del Grupo de Investigación, que permitieron definir de una forma más concreta los **objetivos generales y específicos** de esta Tesis.

1.2.1.- HIPÓTESIS DE PARTIDA

La **primera hipótesis** está relacionada con las **fuentes de datos**: dado que la única fuente de información que permite la identificación y digitalización de las líneas de costa con carácter retrospectivo a escalas de detalle era la fotografía aérea, aunque siempre ha conllevado problemas geométricos por su perspectiva cónica que exige un gran trabajo de georreferenciación, la posibilidad de disponer de un conjunto de **ortofotografías** en la Comunidad Autónoma de Andalucía (**tanto históricas como actuales**) podría proporcionar los resultados esperados.

La **segunda hipótesis** viene derivada de la fuente de datos elegida (ortofotografías), ya que la línea de costa debía ser fotointerpretada (*feature-based proxy*), generando problemas en trabajos previos por la dificultad de comparar los resultados (diferentes fechas de ortofotografías, diferentes fotointérpretes, diferentes criterios de interpretación...). Estos hechos llevan a plantear la segunda hipótesis: si todas las líneas de costa y para todas las fechas fuesen realizadas por un **solo investigador** y con unos **criterios únicos de fotointerpretación**, se podría solventar en parte esta problemática. Sólo este hecho podría hacer comparables las tasas en un área de trabajo tan amplia como Andalucía.

La **tercera hipótesis** también se deriva de los trabajos previos del Grupo de Investigación en los cuales se había detectado la dificultad de proporcionar a los resultados de los trabajos sobre erosión costera previos una reutilización por parte de los agentes públicos que gestionan las playas. Gran parte del inconveniente viene determinado por la dificultad de relacionar los resultados, frecuentemente de difícil

acceso a través de escasas publicaciones científicas centradas en las conclusiones metodológicas o la interpretación y casi nunca disponibles a nivel de detalle, con otras variables de interés administrativo o ambiental (ámbitos administrativos, áreas de gestión ambiental, tipologías morfológicas, etc.). De ello se deriva la **tercera hipótesis de trabajo** en la que se plantea que la incorporación de los datos de partida (líneas de costa para el cálculo de las tasas de erosión) y los resultados de las tasas (puntuales, lineales o poligonales) a una **base de datos espacial**, sustentada por un **modelo de datos** que incluya, igualmente, **otro conjunto de información temática** (tipología morfológicas, presencia de dunas, proximidad de áreas construidas, infraestructuras costeras...) puede ser una solución plausible. Esta estructura metodológica podría solventar estos problemas y proporcionarles a los resultados un **carácter aplicado** con la **elaboración de indicadores** que implicasen la combinación de los datos de erosión con otras variables contenidas en el modelo de datos: indicadores de uso turístico (playa útil), indicadores de vulnerabilidad, indicadores asociados a ámbitos administrativos de gestión, etc.

La **cuarta hipótesis** está relacionada con la amplitud de zona de estudio (todas las playas expuestas de Andalucía). Con la escala de trabajo de 1:2.500 y con los diferentes períodos elegidos para el cálculo de las tasas de erosión, se generaría un significativo volumen de datos cuantitativos de difícil asimilación aunque se pudiese acceder a los datos brutos y calculados. La reflexión sobre estas problemáticas y el interés de su reutilización futura lleva a plantear **la cuarta hipótesis de trabajo**, asumiendo que la forma más idónea de asimilación de los resultados debería ser a través de la **geovisualización** para aprovechar la capacidad integradora de la visualización y su lectura instantánea. Aunque tradicionalmente el instrumento para ello había sido la cartografía temática, en la actualidad, y dado el volumen de datos y su escala, era imprescindible un instrumento más flexible, interactivo y de acceso directo a través de Internet. Todo ello ha llevado a considerar la utilización de un **geovisor web** alimentado por **servicios interoperables según los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC)**, junto a un intenso trabajo para seleccionar la **semiología adecuada**, para solventar esta problemática y garantizar su difusión y acceso público.

1.2.2.- OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Para testar las hipótesis de partida comentadas en el epígrafe anterior se ha definido el **objetivo general** de esta Tesis que se podría formular de la siguiente forma:

“Diseñar e implementar una propuesta metodológica para el cálculo y análisis de las tasas de erosión a medio/largo plazo (1956-2011) en todas las playas expuestas de la costa de Andalucía asociadas a un modelo de datos implementado en una base de datos espacial que permita, además de su explotación temática, el cálculo de indicadores y la difusión web”.

Este objetivo general se podría desglosar en un conjunto de **objetivos específicos** a los que debe dar respuesta secuencial la propuesta metodológica desarrollada a lo largo de la Tesis Doctoral. Estos objetivos han sido definidos tras un amplio análisis bibliográfico de los trabajos y experiencias previas que serán expuestas en el obligado capítulo en una Tesis del **“estado de la cuestión”**. Tras ese análisis se identificaron 5 objetivos específicos:

- ⇒ **Objetivo 1:** realizar una propuesta metodológica para el proceso de **fotointerpretación, identificación y digitalización** de las **líneas de costa** para las fechas de referencia (1956, 1977, 2001 y 2011), utilizando varios indicadores de línea de costa (*feature-based proxy*), pero realizados por un **único fotointérprete** para un conjunto de **ortofotografías actuales e históricas** disponibles en Andalucía.
- ⇒ **Objetivo 2:** realizar una propuesta metodológica para la incorporación de la **geometría e información temática** (tipologías geomorfológicas, presencia de infraestructuras, proximidad elementos urbanos, etc.) de las líneas digitalizadas al conjunto de las tablas temáticas del **modelo de datos de línea de costa** definido por el Grupo de Investigación y soportado por un gestor de **base de datos espacial** (postgreSQL/PostGIS)
- ⇒ **Objetivo 3:** **calcular las tasas de erosión** para diferentes períodos (1956-2011, 1956-1977, 1977-2001, 1977-2011 y 2001-2011) utilizando la herramienta para ArcGis desarrollada por el *U.S. Geological Survey (Digital Shoreline Analysis System –DSAS-)*, así como su análisis espacial y estadístico en el contexto de una base de datos espacial.

- ⇒ **Objetivo 4: garantizar la explotación adicional** de las tasas calculadas, derivada de su tratamiento conjunto con la información temática del **modelo de datos de la línea de costa**, para la **generación de indicadores temáticos**, especialmente los referidos a su efecto en la playa como recurso turístico.

- ⇒ **Objetivo 5: realizar el tratamiento semiológico y cartográfico** de los resultados de los cálculos, análisis y generación de indicadores para la **generación de servicios OGC**, que garanticen la **difusión web** de los contenidos de la Tesis Doctoral en una versión adaptada del **geovisor web** previamente desarrollado por el Grupo de Investigación.

1.3.- ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

El trabajo de investigación presentado se centra en la exposición de una metodología rigurosa para la obtención y el análisis de las tasas de erosión a medio y largo plazo de las playas expuestas del litoral andaluz, así como el cálculo de indicadores con información temática y su difusión por Internet. En este sentido, la presente Tesis Doctoral tiene la siguiente estructura (ver Tabla 1.1):

El **primer capítulo** aborda **planteamientos generales** sobre los que se sustentan los principios de este trabajo. En primer lugar se realiza una breve exposición del **currículo del doctorando**, describiendo el recorrido formativo y profesional en el Grupo de Investigación que ha desembocado en la realización de la presente Tesis. Se describe, desde un contexto científico, espacial y metodológico, la situación actual de la temática abordada, justificando la elección de la misma. Todo ello lleva a la definición de las **hipótesis de partida**, derivadas de la experiencia acumulada en el Grupo de Investigación, permitiendo definir, igualmente, los **objetivos generales y específicos** del presente trabajo. Por último, se detalla el **ámbito de estudio**, realizando un recorrido desde lo general a lo específico, desembocando en las unidades básicas de análisis de las playas expuestas de la costa de Andalucía: los Tramos y las Unidades Fisiográficas.

El **segundo capítulo** se desarrolla en el contexto del **estado de la cuestión**, definiendo el concepto de erosión costera, así como los procesos y causas que la generan. Dado el extenso bagaje científico de la temática, se abordan los antecedentes en investigación más destacados desde un punto de vista metodológico y de fuentes de datos, descendiendo en escala desde los principales estudios a nivel mundial hasta las experiencias de cálculo de erosión costera en el ámbito de estudio. Por último y de cara a la difusión web de los resultados, también se describen los principales antecedentes y experiencias de visores web afines tanto a nivel mundial como nacional y regional.

El **capítulo tercero** presenta las **fuentes de datos** (principales y complementarias) utilizadas para el levantamiento de las líneas de costa, prestando especial atención a las ortofotografías como fuente de referencia. A continuación se plasma todo el **proceso metodológico**, desde labores de entorno previas (definición de criterios *-proxies-*, escala, creación de entorno de digitalización en base de datos espacial *-geodatabase-* y medición de intervalos de incertidumbre de error) hasta el control de calidad topológico final, pasando por el proceso de fotointerpretación, cálculo de tasas y generación de indicadores temáticos. Todo el proceso ha sido abordado de forma paralela a la

incorporación progresiva de los datos generados a los modelos de datos de líneas de costa y de cálculo de tasas. Por último, de cara a la visualización de los resultados, se describen los procesos de representación gráfica de los mismos (semiología), la generación de servicios OGC y su incorporación a un visor web para su difusión.

El **capítulo cuarto**, correspondiente a los **resultados**, ha sido dividido en 4 partes, coincidiendo con los objetivos específicos de la Tesis Doctoral. En primer lugar se describe la **estructura final de la base de datos espacial**, haciendo especial hincapié en las entidades y tablas que la componen, así como en las relaciones entre las mismas. Un segundo resultado, derivado del **cálculo de tasas**, es el análisis de la totalidad de las playas de Andalucía y, concretamente, de 2 Tramos litorales representativos de la misma, uno atlántico y otro mediterráneo. Un tercer resultado, ligado a la **explotación de la información temática** de la base de datos, es la generación de indicadores e índices sintéticos de interés estadístico, descriptivo, ambiental y turístico. Por último, aunque no por ello menos importante, el cuarto resultado aborda la **difusión de los datos** previamente generados mediante servicios OGC integrados en un geovisor web.

En el **capítulo quinto** se extraen las principales **conclusiones** del presente trabajo de investigación, contextualizándolas con las experiencias previas (**discusión**) y desglosadas en base a los objetivos del mismo. De igual modo, se enumeran las **líneas de investigación futuras** del Grupo de Investigación.

Como cierre del trabajo de investigación, el último capítulo (**capítulo sexto**) desglosa las **referencias bibliográficas**.

Adicionalmente, se incluyen 3 apartados específicos, correspondientes a los **índices de figuras y tablas**, así como los **anexos cartográficos** de apoyo utilizados en la presente Tesis Doctoral.

Capítulo	Contenido
1. PLANTEAMIENTOS GENERALES	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Justificación y contextualización ⇒ Hipótesis de partida ⇒ Objetivos generales y específicos ⇒ Ámbito de estudio <ul style="list-style-type: none"> • La costa de Andalucía • Las playas expuestas de Andalucía • Unidades Fisiográficas y Tramos
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Terminología, procesos y causas de la erosión costera ⇒ Antecedentes, fuentes de datos y metodologías de cálculo de la erosión costera <ul style="list-style-type: none"> • Ortofotografía digital • Experiencias derivadas del uso de los productos del vuelo fotogramétrico en Andalucía ⇒ Experiencias sobre el uso de geovisores web para la difusión de tasas de erosión
3. METODOLOGÍA	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Fuentes de datos utilizadas ⇒ Criterios de fotointerpretación (<i>proxies</i>) y digitalización: proceso de levantamiento de datos ⇒ Modelo de datos inicial: tablas preexistentes y nuevas ⇒ Cálculo de tasas de erosión ⇒ Cálculo de indicadores temáticos ⇒ Modelo de datos final ⇒ Semiología para la representación gráfica de resultados ⇒ Difusión web: servicios OGC y geovisor web
4. RESULTADOS	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Estructura final de la base de datos espacial: entidades, tablas y relaciones ⇒ Resultados derivados del cálculo de tasas de erosión ⇒ Resultados derivados de la explotación conjunta (tasas + información temática) para la generación de indicadores ⇒ Resultados de la difusión web <ul style="list-style-type: none"> • Servicios interoperables OGC • Geovisor web <ul style="list-style-type: none"> ○ Utilidades para usuarios generalistas ○ Utilidades para la explotación científica de datos por expertos
5. CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Conclusiones y discusión por objetivos ⇒ Líneas de investigación futuras
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Referencias bibliográficas

Tabla 1.1. Estructura y contenido básico de la Tesis Doctoral.
Fuente: elaboración propia.

1.4.- ÁMBITO DE ESTUDIO

Como se ha indicado en los epígrafes anteriores, una de las características singulares de esta Tesis es que aborda la metodología para el análisis de la erosión⁴ de las playas expuestas en la totalidad del litoral de Andalucía. Este extenso ámbito de estudio, ha sido ampliamente estudiado desde diferentes enfoques temáticos (geológicos, geomorfológicos, sedimentarios, estudios del Cuaternario, etc.), por lo que en este apartado solo serán contemplados aquellos aspectos que tienen una clara relación con los objetivos de esta Tesis. Para ello utilizaremos una estructura en este epígrafe que progresivamente nos irá centrando en al ámbito específico de estudio: **las playas expuestas de Andalucía**.

- ⇒ Descripción general del litoral andaluz.
- ⇒ Las costas de Andalucía: características morfo-estructurales, geomorfológicas y presión antrópica, tanto en su vertiente atlántica como mediterránea.
- ⇒ Las playas expuestas de Andalucía: tipologías y formaciones litorales a las que están asociadas.
- ⇒ Presentación sintética de las Unidades Fisiográficas (sectores con conexión desde la perspectiva del tránsito sedimentario) en que pueden subdividirse los Tramos con playas expuestas para el análisis de la erosión.

1.4.1.- DESCRIPCIÓN GENERAL

Andalucía es una Comunidad Autónoma española situada en el extremo meridional de la Península Ibérica. Limita al norte con las comunidades de Extremadura y Castilla-La Mancha, al este con Murcia, al oeste con Portugal y al sur con el continente africano (ver Figura 1.1). Tiene una extensión de 87.598 Km² y una población total de 8.381.213 habitantes (IECA, 2016). La densidad de población es de 96,9 hab/Km², ligeramente superior a la media nacional (CEEC, 2015), donde la mayoría de la población se concentra en los centros regionales, las grandes ciudades y sus áreas metropolitanas y,

⁴ En un contexto analítico y metodológico, el término "erosión" al que alude la pérdida de volumen sedimentario en ambientes litorales, será utilizado a lo largo del presente trabajo para la definición de las oscilaciones lineales del frente costero, usado de forma ambigua tanto para la descripción de procesos avance como de retroceso del mismo.

cada vez más, en la franja litoral (Benabent, 1998), donde se concentra el 40% de la misma. Buen ejemplo de ello es el exponencial incremento de la superficie urbanizada en los primeros 5 Km. del litoral, desde un original 1,91% en 1956 a un 16,57% en 2007 (Villar y Ojeda, 2012).

Frente a los grandes sectores productivos tradicionales como son la agricultura, la construcción y la industria, dentro del sector servicios es el turismo el que más se ha visto incrementado en la última década, representando en la actualidad un 13% del PIB andaluz (SAETA, 2014). Merece una mención especial, por su relación con esta Tesis, el turismo de sol y playa, paradigma de modelo vacacional y de ocio en la región, el cual acapara casi el 60% de los usuarios turísticos totales anuales.

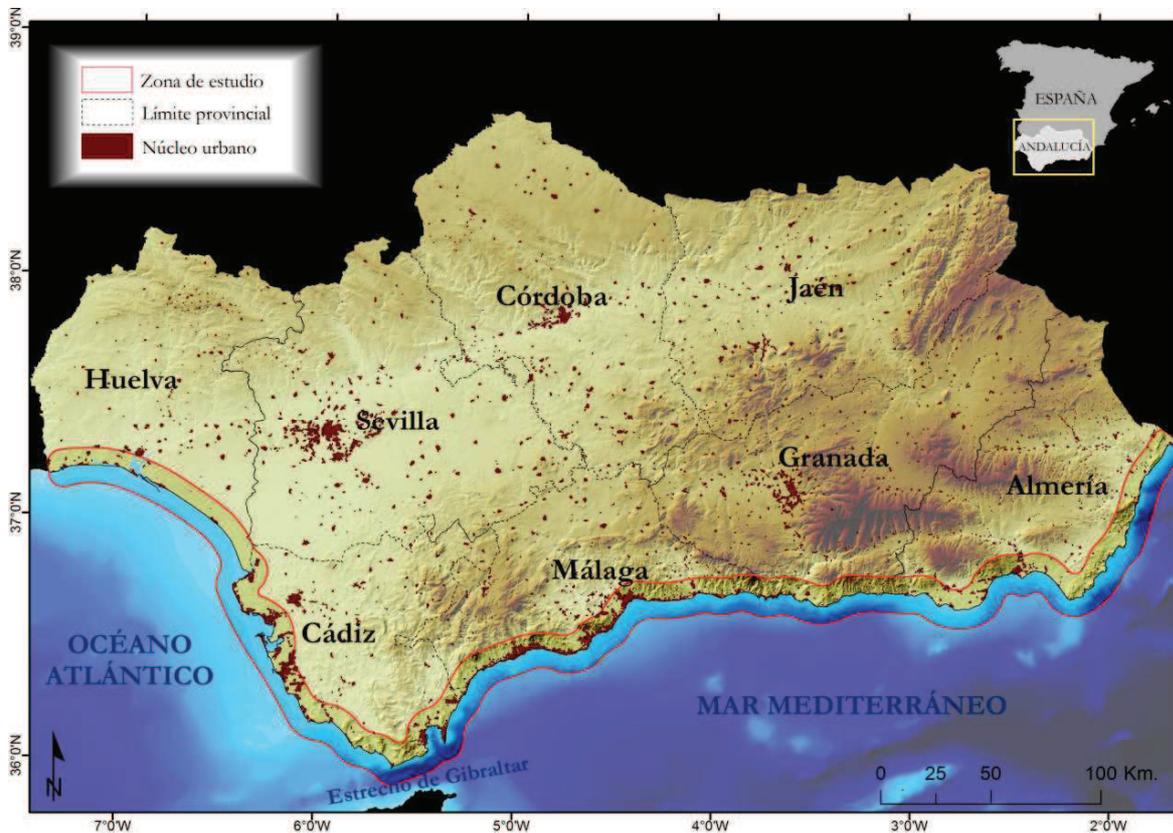


Figura 1.1. Ámbito de estudio.
Fuente: elaboración propia.

La cada vez mayor presión antrópica pone en cuestión la sostenibilidad de la enorme diversidad biológica, geológica y paisajística de la región, lo que ha supuesto la protección de ecosistemas con alto valor natural y cultural a través de la “Ley de

Inventario⁵ y posteriormente mediante el *Decreto 95/2003*⁶, dando como resultado la actual Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía. En este aspecto, Andalucía es una de las regiones con mayor superficie protegida de España (en torno al 30% de la superficie total de la región), con un total de 242 espacios naturales que cuentan con una superficie total de 24.700 Km², de los cuales sólo 700 son de ámbito marino (CMAOT, 2001) (ver Figura 1.2).

Destaca la vertiente atlántica con un 43% de su extensión bajo alguna figura de protección, correspondientes en su mayoría al Parque Nacional y entorno del Parque Natural de Doñana, Parques Naturales de Bahía de Cádiz, Estrecho, La Breña y Marismas del Barbate y Parajes Naturales de las Marismas de Isla Cristina y de los ríos Piedras/Flecha de El Rompido y Odiel. No obstante, la vertiente mediterránea sólo posee un 23%, cuyo territorio total protegido corresponde a los Parques Naturales de Cabo de Gata (62%), del Estrecho (18%) y el Paraje Natural de Punta Entinas-Sabinar (9,5%). El 10,5% restante corresponde a Reservas, Parajes y Monumentos Naturales aislados, correspondientes a las marismas del río Palmones, albufera de Adra, acantilados de Maro-Cerro Gordo, peñón de San Cristóbal, desembocaduras fluviales del Guadiaro y Guadalhorce y reservas marinas de Roquetas de Mar y Alborán.

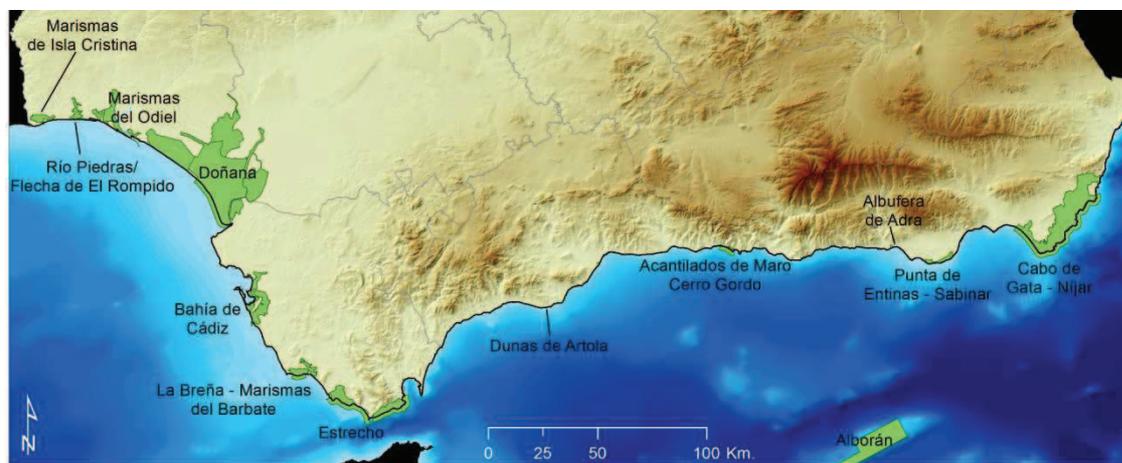


Figura 1.2. Principales espacios naturales protegidos del litoral andaluz.
Fuente: elaboración propia.

⁵ Ley 2/1989, de 18 de julio, por la que se aprueba el Inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía y se establecen medidas adicionales para su protección. Disposición 20636 del Boletín Oficial del Estado, nº 201. Miércoles, 23 de agosto de 1989. Pp. 27071-27129.

⁶ Decreto 95/2003, de 8 de abril, por el que se regula la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía y su Registro. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, nº 79. Lunes, 28 de abril de 2003. Pp. 8831-8833.

La sobreexplotación de recursos en zonas altamente pobladas (franja costera y áreas metropolitanas, fundamentalmente) o en zonas protegidas (comarcas situadas dentro de espacios naturales protegidos) ha hecho necesaria la incorporación de políticas de ordenación ambiental y territorial como medida contra la masificación y demanda de suelo. En este sentido, se han puesto en marcha los denominados *planes subregionales*, instrumentos de ordenación territorial que tienen como función principal el establecimiento de los elementos básicos para la organización y estructura del territorio, sirviendo en su ámbito de marco de referencia territorial para el desarrollo y coordinación de las políticas, planes, programas y proyectos de las Administraciones y Entidades Públicas, así como las actividades de los particulares. Actualmente hay 18 planes aprobados, 1 en trámite de aprobación y 3 en proceso de redacción. Más específicamente, una iniciativa administrativa para intentar estandarizar las políticas urbanísticas en la costa andaluza ha sido aprobada en 2015: el Plan para la Protección del Corredor Litoral de Andalucía⁷.

En este aspecto, cabe destacar la importancia del litoral, no sólo como ecosistema natural, sino también como fuente de recursos económicos y territoriales en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Supone un eje dinamizador de primer orden, una vía de comunicación a gran escala, una fuente de recursos y, para determinados sectores, el motor económico y turístico de la zona.

1.4.2.- LA COSTA DE ANDALUCÍA

El ámbito costero andaluz objeto de estudio del presente trabajo de investigación, se extiende, por lo tanto, a lo largo de 917 Km de frente costero (Díaz et al., 2012), desde la desembocadura del Río Guadiana en Ayamonte (Huelva) hasta Cala Cerrada, en el municipio almeriense de Pulpí (ver Figura 1.3).

⁷ Decreto 141/2015, de 26 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Protección del Corredor Litoral de Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, nº 139. Lunes, 20 de julio de 2015. Pp. 2-543.

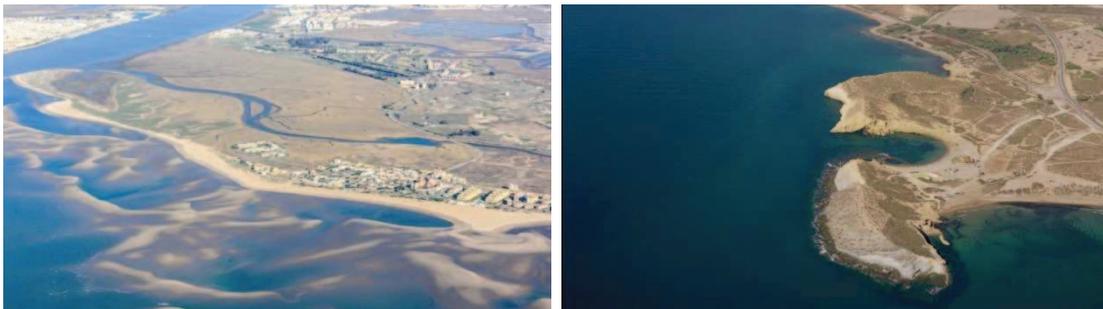


Figura 1.3. Izquierda: desembocadura del río Guadiana y playa de Isla Canela (Ayamonte).
Derecha: Cala Cerrada (Pulpi).

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).

La caracterización geomorfológica de la costa andaluza posee una sobresaliente variedad de ambientes litorales (marismas mareales y pluviales, playas, flechas litorales, acantilados, plataformas de abrasión) como consecuencia de la combinación de múltiples factores (Ojeda, 2003). Entre ellos destacan:

- ⇒ **Ubicación geográfica:** su situación fronteriza (entre los 36° y los 39° Norte) entre las húmedas latitudes medias y el árido cinturón intertropical, unida a la exposición de sus sectores costeros, uno al ámbito atlántico y otro al mediterráneo, provoca un extenso mosaico climático que determina las características hidrológicas de los ríos cuyos sedimentos nutren las playas andaluzas.

- ⇒ **Contexto geológico:** la inserción del ámbito de estudio en la zona de contacto entre las placas africana y euroasiática, sometidas a un continuo e inconcluso proceso de aproximación (Ojeda, 1988b), le otorgan una intensa actividad tectónica y ha sido objeto de diferentes procesos orogénicos que se remontan a la Orogenia Hercínica, hace 550 millones de años. El plegamiento de los Sistemas Béticos al Sur del Macizo Ibérico durante la Orogenia Alpina (25 millones de años), en sentido Suroeste-Noreste, aislaron un antiguo geosinclinal, encajado entre ambas unidades de relieve (ver Figura 1.4). La profosa generada (actual Depresión del Guadalquivir), hoy en día colmatada casi en su totalidad por procesos postorogénicos de relleno, ha dado lugar a relieves costeros, en su fachada atlántica, muy suaves y de escasa pendiente, cuya prolongación marina ha generado una amplia plataforma continental (a excepción de las inmediaciones del Estrecho de Gibraltar, donde afloran las estribaciones Béticas). Por el contrario, la cercanía de la zona interna de los Sistemas Béticos al mar ha desarrollado un litoral mediterráneo de perfil recortado y relieve

abrupto, desarrollándose sobre una plataforma continental estrecha y de acusada pendiente.



Figura 1.4. Principales unidades geológicas de Andalucía.
Fuente: elaboración propia a partir de CMAOT, 2006.

⇒ **Cambios en el nivel medio del mar:** el nivel del mar, como zona de contacto entre las tierras emergidas y las aguas oceánicas, ha estado sometido a constantes oscilaciones a lo largo de la historia terrestre. Desde el alto Plioceno y durante todo el Cuaternario hasta la actualidad (2,7 millones de años) se tiene constancia de diferentes oscilaciones relacionadas con, al menos, 52 estadios isotópicos (Gibbard y Cohen, 2008) (ver Figura 1.5). Se define “estadio isotópico marino” (anteriormente llamado “estadio isotópico del oxígeno”) a cada una de las distintas etapas que pueden adoptar los átomos del mismo en función a las características del medio marino en el que se encuentra, definiéndose en función de la relación entre O^{16}/O^{18} . De ese modo, durante las glaciaciones, las masas de agua marina son relativamente más ricas en isótopos O^{18} debido a una mayor concentración de agua dulce (más ricas en isótopos O^{16}) en las zonas cubiertas por hielo y durante las interglaciaciones más pobres al volver estas aguas al océano con la fusión de las aguas continentales. La datación

cronoestratigráfica a través de la presencia de uno u otro isótopo en distintos fósiles marinos (foraminíferos) permite la obtención de curvas de paleotemperaturas y, por tanto, derivar los supuestos niveles del mar en los que se desarrollaron los mismos (Shackleton y Opdyke, 1973, 1976, 1977; Shackleton y Cita, 1979; Shackleton y Hall, 1984). Las pasadas y presente posición del nivel medio del mar modifican sustancialmente la morfología litoral y, por lo tanto, la dinámica del ámbito costero, siendo estos fenómenos objetos de estudio a través de un extenso abanico metodológico y a distintas escalas globales (Peltier y Tushingham, 1989; Douglas, 1991; Church y White, 2006; IPCC, 2014), regionales (List et al., 1997; Zazo et al., 2008; Marrack, 2015) y locales (Lario, 1996; Dabrio et al., 2000; Borja y Fernández, 2006; Fraile, 2011). Una primera consecuencia de estos estudios es la reciente configuración de la costa andaluza, como las de la mayor parte del mundo, todavía en período de ajuste al nivel del mar actual (estado isotópico 1), alcanzado en el denominado “Máximo Transgresivo Holoceno” (“Flandriense” en las costas atlánticas) hace entre 6.000 (Morales y Borrego, 2008) y 7.000 años (Zazo et al., 1996; Rodríguez et al., 1997).

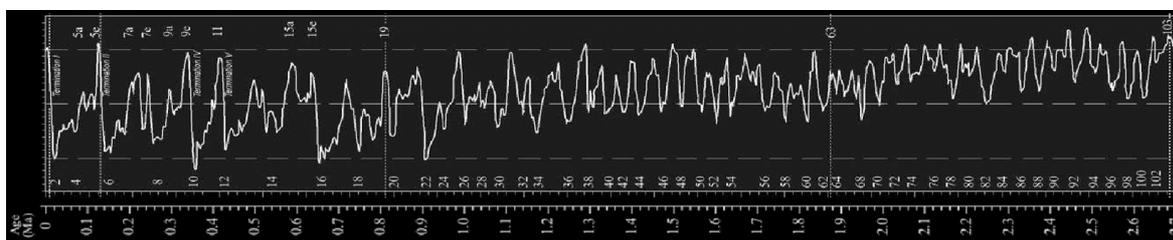


Figura 1.5. Estadios isotópicos marinos durante el Cuaternario.
Fuente: extraído de Gibbard y Cohen, 2008.

⇒ **Dinámica litoral:** los agentes físicos que la dominan (oleaje, marea, corrientes y vientos) han sido los encargados de modelar las costas hasta su estado actual, teniendo en cuenta el presente nivel medio del mar que ha mostrado oscilaciones (+-1 ó 2 m.) desde el ya mencionado Máximo Transgresivo Holoceno. En este sentido, las fachadas atlántica y mediterránea se ven sometidas a diferentes agentes que han propiciado una evolución litoral distinta (Ojeda, 2003).

Por una parte se encuentra la **fachada atlántica**, de escasa pendiente longitudinal, a la que avanan los grandes ríos que drenan la Depresión del Guadalquivir. Se trata de un ámbito costero de suave relieve y amplia plataforma

litoral, influenciada por un amplio *fetch*⁸ (abierta al Océano Atlántico) que origina un oleaje de fondo más energético que en la fachada mediterránea. El rango de marea es de carácter mesomareal (>2 m.) y la orientación de la costa es en sentido noroeste-sureste, con zonas cuyo ángulo de exposición al oleaje es de 45°, generando una potente deriva litoral que favorece el transporte sedimentario longitudinal hacia el sureste. Ello ha facilitado el desarrollo de sistemas de flechas litorales que han cerrado amplias ensenadas asociadas al Máximo Transgresivo Flandriense (Guadalquivir, Tinto-Odiel...), aislándolas del oleaje y dando lugar al desarrollo de vastas extensiones marismas. La presencia de vientos procedentes tanto del tercer como del cuarto cuadrante ha propiciado el desarrollo de amplios sistemas dunares en los sectores con un balance sedimentario positivo, algunos de ellos de gran dinamicidad (dunas móviles de Doñana, Bolonia, Valdevaqueros...).

Por otra parte, se encuentra la **fachada mediterránea**, ámbito con presencia de relieves más abruptos que, en un número considerable de veces, contactan directamente en el mar generando sectores acantilados. El oleaje es menos energético debido a la proximidad de África, que reduce el *fetch* al igual que el régimen mareal, donde sólo en contadas ocasiones (provocadas por condiciones atmosféricas extraordinarias –*surges*–) su amplitud alcanza el metro de altura, pudiendo ser consideradas como costas micromareales (<2m.). La proximidad de las estribaciones Béticas se traduce en la presencia de una red hidrográfica asociada a cuencas de pequeña dimensión y de acusada pendiente que, sólo durante eventos meteorológicos extremos, aporta sedimentos al litoral de forma súbita e irregular. Todos estos condicionantes, favorecen la presencia de deltas a los que a veces se asocian albuferas, playas estrechas de arena de granulometría gruesa y una deriva litoral muy irregular, interrumpida constantemente por formaciones acantiladas de diversa envergadura (De la Hera, 1998).

⇒ **Intervenciones antrópicas:** el interés que supone el mar para el hombre y sus actividades económicas hacen del litoral el ámbito más antropizado del mundo,

⁸*Fetch*: En el argot oceanográfico, longitud de carrera del viento o longitud sobre la que un viento generador de trenes de olas ha soplado (George, 1991).

y en Andalucía no es una excepción. La transformación de la morfología y la dinámica litoral mediante la construcción de infraestructuras supone una modificación de la morfología de la costa y de los agentes que actúan en ella. En muchos casos suponen una barrera artificial al libre tránsito de sedimentos, alterando de forma casi definitiva la dinámica imperante en la zona (ver Figura 1.6). Al amplio abanico de infraestructuras a lo largo del frente litoral hay que añadir, en un segundo plano, las alteraciones que se llevan a cabo en las cuencas vertientes y que afectan a la red hidrográfica que avena el litoral. Éstas suponen una retención casi absoluta de los sedimentos más groseros, desabasteciendo al litoral de su principal fuente de alimentación. Como último punto, ha de incluirse al ser humano y su actividad como agentes claves en el efecto invernadero e, indirectamente, en la paulatina subida del nivel medio del mar (IPCC, 2014). En este sentido, la franja litoral andaluza está densamente poblada, aunque su distribución sea irregular a lo largo de la costa. Mientras que la fachada atlántica se encuentra poco intervenida antrópicamente, respondiendo a patrones de concentración elevados exclusivamente en capitales regionales y núcleos turísticos puntuales; la costa mediterránea presenta un índice de ocupación mucho mayor, dada la consolidación temprana del turismo de litoral como causa fundamental de la demanda de suelo disponible (Villar y Ojeda, 2012).



Figura 1.6. Ejemplos de infraestructuras del litoral andaluz. Izquierda: Puerto de Chipiona (Cádiz). Derecha: sistema de rompeolas en la Playa de Benaluquete, en Adra (Almería). Fuente: MAPAMA.

Por todo ello, se desarrollan 2 ambientes litorales muy variados, ligados a contextos geoestructurales diferentes y animados por agentes dinámicos diferentes. El resultado son 2 vertientes claramente marcadas, las cuales se describen a continuación.

1.4.2.1.- VERTIENTE ATLÁNTICA

La vertiente atlántica andaluza se desarrolla en una franja litoral de unos 300 Km. aproximadamente, distribuida a lo largo de 20 municipios pertenecientes a las provincias de Huelva y Cádiz. Se extiende desde la desembocadura del río Guadiana en el municipio onubense de Ayamonte hasta la punta de Tarifa, en Cádiz (ver Figura 1.7).



Figura 1.7. Formaciones destacadas de la vertiente atlántica andaluza.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MAPAMA y www.andaluciainformacion.es

Desde el punto de vista geológico, la basculación peninsular y los procesos de relleno postorogénicos procedentes del Macizo Ibérico al Norte y los Sistemas Béticos al Sur, favorecieron la mayor parte de la colmatación de la Depresión del Guadalquivir, a cuyo frente occidental están asociadas las mayor parte de las formaciones litorales en la fachada atlántica. La morfología próxima al frente costero, por tanto, responde a un relieve suave, de escasa pendiente, donde predominan los procesos acumulativos tanto de carácter fluvial como marino. Desde el punto de vista tectónico, se trata de una zona medianamente activa, dada la cercanía relativa de la zona de la convergencia entre las placas de Eurasia y África (Vázquez y Vegas, 2000). A gran escala, por lo tanto, los factores estructurales (plegamientos, fallas, bloques subsidentes, etc.) controlan, como lo

hacen en todas las costas del planeta, la configuración de la costa atlántica andaluza a gran escala.

La evolución cuaternaria de las costas atlánticas andaluzas parte del contexto estructural antes comentado (substrato litológico, estructuración en bloques, etc.) e interacciona con los procesos litorales controlados por las diferentes posiciones del nivel del mar, hasta llegar a su configuración actual. Evidencias antiguas de esas posiciones pretéritas del nivel del mar se encuentran presentes puntualmente tanto en formaciones sedimentarias litorales (terrazas marinas en el entorno de la Bahía de Cádiz), como en formas erosivas (las espectaculares plataformas litorales que superan los 100 m. de altitud –rasas-, labradas en el sector sur del Peñón de Gibraltar). Más frecuentes, obviamente, son las evidencias del mencionado último interglaciar (estadio isotópico 5, Tirreniense o Ouljiense en la terminología más clásica), a lo largo de las costas gaditanas, generalmente en la forma de terrazas marinas o dunas oolíticas (Getares).

El Máximo Transgresivo Flandriense configuró una línea de costa muy diferente a la actual. En realidad se trataba de una costa recortada, representada por una sucesión de bahías y promontorios, resultado de la inundación por el ascendente nivel del mar de los principales cauces fluviales y zonas subsidentes de la vertiente atlántica andaluza. En la costa de Huelva se conformaron así las bahías del estuario del Guadiana, las ligadas a las desembocaduras del Piedras y Tinto-Odiel y la espectacular bahía asociada a la desembocadura del Guadalquivir, que penetraba hasta la posición de la ciudad de Sevilla (ver Figura 1.8). En la costa gaditana, se configuró una amplia bahía que inundaba las actuales marismas del Guadalete, dejando los promontorios sobre los que se asientan las ciudades de Cádiz y San Fernando, configurados como islas (Gavala, 1992).

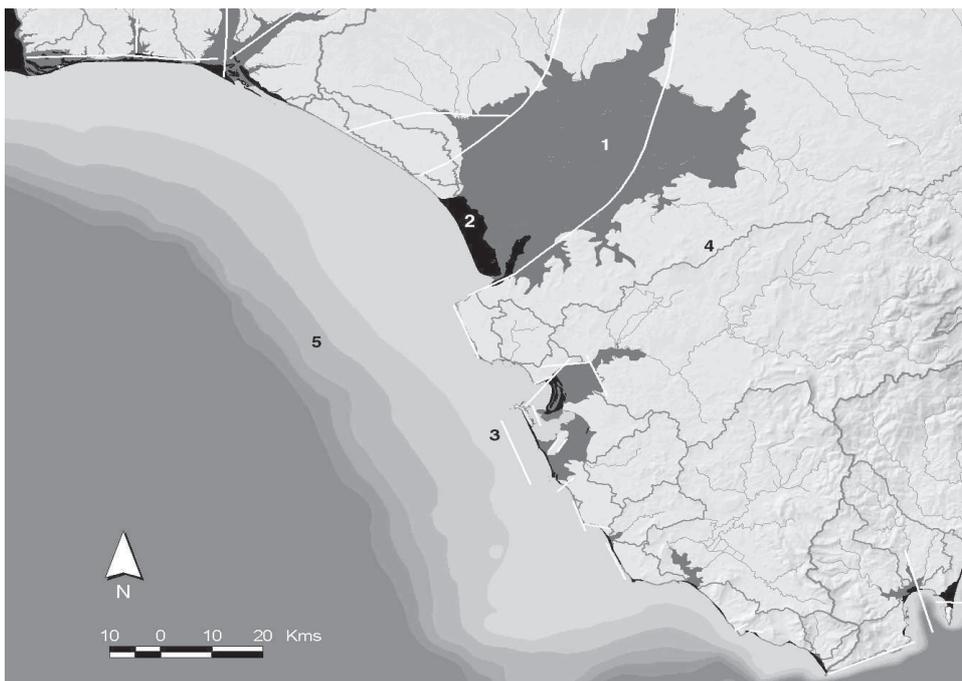


Figura 1.8. Costas atlánticas andaluzas: 1.- Límite de la Transgresión Flandriense en las antiguas bahías y ensenadas, posteriormente rellenas por sedimentos finos (marismas); 2.- Formaciones arenosas litorales (flechas, playas-barrera...), responsables del cierre de las ensenadas a la influencia del oleaje; 3.- Principales alineamientos y accidentes estructurales con incidencia morfológica en la línea de costa; 4.- Divisorias de aguas de las principales cuencas fluviales; 5.- Límite de la plataforma continental.
Fuente: Ojeda, 2003.

Fruto de esta evolución, desde el punto de vista de la geomorfología litoral, se constatan dos zonas claramente diferenciadas. Por un lado se encuentra la zona occidental (Ayamonte-Conil), compuesta por formaciones sedimentarias litorales (islas-barrera evolucionadas, flechas y contraflechas litorales, tómbolos....) que, al aislar antiguas bahías y ensenadas asociadas a las desembocaduras de los principales ríos que avenan hacia la costa y/o de origen tectónico, han favorecido el desarrollo de amplios espacios de marismas mareales, algunas evolucionadas hacia marismas fluvio-pluviales (Doñana). La presencia de estas formaciones sedimentarias en sectores con un balance sedimentario positivo y el régimen de vientos dominante han favorecido el desarrollo de amplios sectores dunares y mantos eólicos. Por otra parte, se encuentra la zona meridional (Conil-Tarifa), con una clara y progresiva influencia de las formaciones flyshoides propias del Campo de Gibraltar (Martín, 1985), donde se desarrollan formaciones arenosas y playas de extensión variable, cuya dinámica longitudinal es interrumpida por la presencia de acantilados.

La evolución reciente y la dinámica de estas formaciones litorales se explican debido al origen terrígeno (aportes fluviales) de la mayoría de los sedimentos de alimentan las playas. Sin embargo, en la actualidad, la mayor parte de estos ríos (Guadalquivir, Tinto-Odiel, Guadalete, Barbate...) no tienen capacidad de transportar sedimentos de tamaño grosero para alimentar las playas por la escasa pendiente longitudinal de su tramos finales que discurren por el extremo distal de la Depresión Bética. De hecho, la mayor parte de ellos los depositan en los tramos altos de las marismas mareales que se encuentran asociados a sus desembocaduras. Sólo el río Guadiana, al descender directamente desde Sierra Morena, tiene capacidad para aportar sedimentos arenosos a las playas. Con unos aportes fluviales anuales medios estimados entre los 4.919 (Morales et al., 1994) y los 4.925 Hm³ (Borrego et al., 2000) para la serie de años comprendida entre 1946-1947 y 1989-1990, se convierte en la principal fuente de sedimentos para toda la costa onubense. Los sectores erosivos se convierten, en el resto del litoral atlántico, en fuentes zonales de sedimentos que son distribuidos a lo largo de la costa por las potentes derivas hacia el sureste que caracterizan toda la fachada atlántica, especialmente en la costa onubense con un tránsito sedimentario estimado en unos 340.000 m³ (Morales, 2010). Los aportes movilizados por la deriva se reducen en el resto del ámbito atlántico, oscilando entre los 30.000 y los 80.000 m³ anuales según zonas (MAPAMA, 2013b). Todo ello provoca la presencia generalizada de amplias playas de arena de granulometría fina, expuestas a niveles de energía media-alta por el oleaje y con gran capacidad de generar cambios topobatimétricos en la morfología de las playas. Suelen responder a perfiles disipativos, donde no existen bermas aparentes y cuyo perfil en bajamar refleja la constante llegada de barras longitudinales con senos y crestas poco marcados (MAPAMA, 2007).

El nivel de antropización de la costa atlántica es comparativamente bajo debido a, fundamentalmente, dos factores condicionantes. En primer lugar, el desarrollo tardío del turismo y de viviendas de segunda residencia en el sector atlántico (sobre todo el subsector onubense), a excepción de áreas urbanas propias de núcleos costeros tradicionales y capitales provinciales (aglomeraciones urbanas de Huelva y Bahía de Cádiz), así como de núcleos turísticos puntuales consolidados de desarrollo más reciente (Isla Canela, Islantilla, El Portil, Matalascañas, Costa Ballena, La Barrosa, El Palmar, Caños de Meca o Zahara de los Atunes, entre otros). En segundo lugar, la presencia de espacios naturales protegidos, que evitan la ocupación de la franja costera o, al menos, la

regulan sustancialmente. En este aspecto, la vertiente atlántica presenta 130 Km. de costa protegidos (43% del total).

1.4.2.2.- VERTIENTE MEDITERRÁNEA

La vertiente mediterránea se desarrolla a través de 615 Km de costa que se distribuyen a lo largo de 40 municipios de las provincias de Cádiz, Málaga, Granada y Almería. Se extiende desde la Punta de Tarifa (Cádiz) hasta Cala Cerrada, en el municipio almeriense de Pulpí (ver Figura 1.9).



Figura 1.9. Formaciones destacadas de la vertiente mediterránea andaluza.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MAPAMA.

La Orogenia Alpina, desarrollada durante el Oligoceno y el Mioceno como consecuencia del encajamiento de la subplaca de Alborán entre las placas euroasiática y africana elevó y plegó las zonas Internas y Externas del Sistema Bético, en sentido Suroeste - Noreste. Las estribaciones de las Béticas en su extremo más occidental las formaron materiales con alternancias turbidíticas, generando las formaciones flyshoides del Campo de Gibraltar. La proximidad de la zona de contacto entre las placas han provocado la presencia de un relieve abrupto cercano al mar y, por tanto, una costa sinuosa asociada a una estrecha banda de sedimentos fluvio-coluviales entre los relieves

montañosos y el mar y con una plataforma continental mucho más estrecha que en la fachada atlántica. Por otra parte, el régimen compresivo, característico de este sector de las Béticas desde el Mioceno (Sanz de Galdeano, 1983), ha reactivado un conjunto de fallas y lineamientos estructurales que explican gran parte de la morfología de la costa a nivel "macro" (corredor de desgarre Alicante-Almería, compartimentación en bloques del Campo de Dalías, etc.), así como la presencia del complejo volcánico del Cabo de Gata que, por otra parte, le proporciona a este sector costero almeriense unas características peculiares.

Las diferentes variaciones del nivel del mar a lo largo del Cuaternario y la interacción de los procesos litorales con el dispositivo geoestructural comentado (neotectónica, litología, etc.) son los responsables de la evolución de la costa mediterránea hasta nuestros días. El ejemplo más evidente de antiguas formas costeras erosivas en materiales calizos, asociadas a antiguas posiciones del nivel del mar, se localiza en la Plataforma del Candado (Málaga) a más de 50 m. sobre el nivel del mar actual (rasas) y las plataformas de depósitos marinos (terrazas) que de forma escalonada descienden hasta el nivel del mar actual en el Campo de Dalías. El nivel del mar durante el Máximo Transgresivo Holoceno (estadio isotópico 1) inundó los profundos valles encajados de ramblas y los cauces de los principales ríos (Guadiaro, Guadalhorce, Andarax, Almanzora...), configurando en éstos profundas ensenadas y definiendo una costa entrecortada, también, muy diferente a la actual (Schubart et al., 1989).

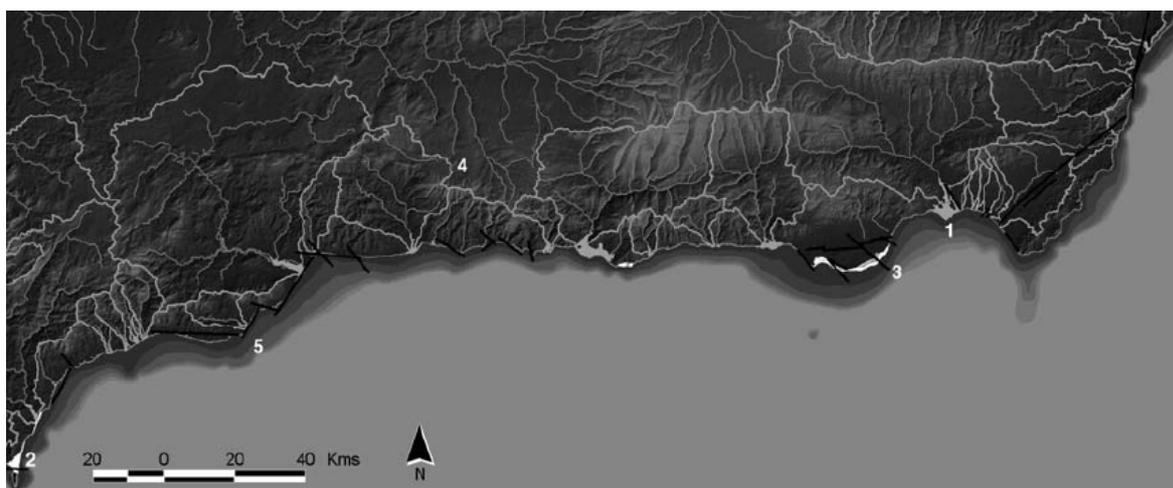


Figura 1.10. Costas mediterráneas andaluzas: 1.-Rellenos de las antiguas ensenadas por depósitos fluviales y fluvio-columviales formando deltas y planicies litorales; 2.- Formaciones arenosas litorales (tómbolos, playas-barrera...) post-flandrienses; 3.- Principales alineamientos y accidentes estructurales con incidencia morfológica en la línea de costa; 4.- Divisorias de aguas de las principales cuencas fluviales; 5.- Límite de la plataforma continental.

Fuente: Ojeda, 2003.

Estos hechos, junto al carácter torrencial del clima mediterráneo andaluz, explican la actual configuración de la morfología litoral. Las características descritas son homogéneas generalmente a lo largo de toda la costa, donde la torrencialidad de los ejes fluviales se va intensificando hacia el Este. Ello propicia el desarrollo de planicies litorales por acumulación de depósitos fluvio-coluviales a los pies de los relieves montañosos en el sector más occidental (Gibraltar-Málaga), iniciándose con los depósitos fluviales asociados a la desembocadura del Guadiaro que, desplazados hacia el Sur, favorecen la formación de largas playas con dunas asociadas, contribuyendo a la conformación del espectacular tómbolo que une Gibraltar al continente. A partir de Málaga y hasta la desembocadura del Guadalhorce con sus depósitos fluviales, la red hidrográfica y el régimen torrencial favorecen el desarrollo de diferentes formaciones deltaicas asociadas a las desembocaduras de ríos y ramblas (Vélez, Adra, Andarax...), separados por playas adosadas a depósitos coluviales en la base de sectores acantilados sobre materiales de diferentes litologías. Las formaciones sedimentarias resultantes, por lo tanto, son de escasa amplitud y, a menudo, interrumpidas por la aparición de acantilados y plataformas de abrasión marinas de altura variable. Una excepción a estas características es el espectacular sistema de formaciones arenosas litorales (flechas, cordones litorales, etc.), desarrolladas desde el Máximo Transgresivo Holoceno al Sur de la plataforma del Campo de Dalías. Estas formaciones aíslan un sistema de albuferas profundamente transformadas por la acción antrópica. En el extremo oriental de la zona de estudio, se observan materiales volcánicos asociados al Cabo de Gata y la Sierra de la Serrezuela (Compán, 1982), con un paisaje litoral representado por playas de arena oscura y acantilados en visera. El extremo oriental de la provincia almeriense se completa con el delta de la desembocadura de río Almanzora y los sectores acantilados de la Sierra de Cabrera.

Desde el punto de vista de la dinámica litoral, ya se ha comentado el régimen micromareal de toda la fachada mediterránea, donde el rango de mareas es inferior a 1 m., pudiéndose elevar este rango por el efecto de las marea meteorológicas (*surges*) que, asociadas al paso de borrascas, son elementos muy importantes en los procesos erosivos extremos de todo el sector. El oleaje es, por lo tanto, el principal agente modelador del frente costero aunque, en general, menos energético que en la fachada atlántica por la limitación al *fetch* que impone la presencia del continente africano. Las direcciones dominantes de aproximación del oleaje imponen derivas netas hacia el sur en el sector más occidental (Estepona-Gibraltar) y en la costa oriental almeriense. El resto

de la costa, con una orientación Este-Oeste presenta derivas netas variables según el grado de exposición/protección de cada sector a los vientos dominantes y al oleaje inducido por ellos. Las aportaciones de los principales ejes fluviales, en mayor medida cuanto más nos desplazamos hacia levante, se producen casi exclusivamente en eventos meteorológicos excepcionales, aportando un gran volumen de sedimentos detríticos a las desembocaduras de ríos y ramblas que hacen progradar de forma notable los frentes deltaicos asociados (deltas de las ramblas de Albuñol y Huárea). En esta zona, el volumen de tránsito sedimentario estimado oscila entre los 50.000 y los 80.000 m³ anuales, muy irregulares espacialmente debido a la abundante presencia de infraestructuras (MAPAMA, 2009). Las condiciones descritas provocan la presencia generalizada de playas de arenas medias a gruesas, con niveles de energía bajos, donde el borde de la berma marca el inicio del frente de playa. En la playa seca (*backshore*) pueden apreciarse restos de bermas y escarpes correspondientes a perfiles más retrasados producidos por condiciones de oleaje más energéticas. Sobre la zona de *swash* son frecuentes los *beach cusps* y suele existir un escalón en la parte inferior del frente de playa compuesto de materiales más gruesos, después del cual la pendiente del perfil baja considerablemente, conservando una forma cóncava (MAPAMA, 2007).

Teniendo en cuenta el origen fluvial de los principales aportes sedimentarios al sistema litoral para toda la fachada mediterránea, el impacto antrópico derivado de la regulación de las cuencas por embalses (en los ríos Adra y Almanzora, de consecuencias críticas), la ocupación de cauces y ramblas (campos de golf y urbanizaciones) y la extracción de áridos constituyen la principal causa del comportamiento regresivo de la casi totalidad de playas mediterráneas y frentes de deltas. La extracción de áridos para la agricultura intensiva litoral y la construcción, procedentes de las formaciones arenosas litorales, ha tenido consecuencias parecidas (Viciana, 1998), además de alterar significativamente los ecosistemas dunares (Campo de Dalías, Marbella...). Este déficit sedimentario generalizado se ve incrementado en algunos tramos por la profusa construcción de infraestructuras costeras transversales (puertos, diques y espigones) que interceptan el tránsito sedimentario longitudinal (derivas), aislando importantes sectores de sus fuentes de alimentación (puertos de Motril, José Banús, Sotogrande...), así como la intensa urbanización próxima a la línea de costa, que interfiere en la dinámica transversal de las playas. La puesta en marcha de planes de protección de espacios con alto valor natural ha conseguido mantener 143,5 Km. de costa libres de ocupación (un 23% de la costa mediterránea andaluza).

1.4.3.- LAS PLAYAS EXPUESTAS DE ANDALUCÍA

La región posee un total de 372 playas repartidas a lo largo de 620 Km. (en torno al 70% del litoral) correspondientes a 61 municipios costeros, 20 en la vertiente atlántica y 41 en la mediterránea, los cuales suponen el 9,1% del territorio andaluz que aloja al 35,6% de la población total (SAETA, 2014) (ver Tabla 1.2). Estos datos (longitud de playas expuestas), extraídos de fuentes estadísticas y documentos técnicos o administrativos pueden variar sensiblemente (sobre todo los expresados porcentualmente) en función de la línea de costa utilizada para realizar los cálculos (una problemática abordada en el epígrafe 4.3 de este documento), por lo que se utilizarán los datos calculados en esta Tesis para la presentación sintética del objeto específico de la misma: las playas expuestas de la costa de Andalucía.

Tipología	Línea larga (Km.)	Línea corta (Km.)	Porcentaje larga	Porcentaje corta
Playas expuestas	625,63	620,22	27,14	69,01
Costa rocosa	151,57	151,57	6,42	16,47
Estuarios y caños de marisma	1.232,99	25,57	51,41	2,79
Costa expuesta antropizada	365,08	111,69	14,69	10,85
Otros	7,75	7,81	0,34	0,88
TOTAL (Km.)	2.382,99	916,97	100	100

Tabla 1.2. Longitud y porcentajes globales de líneas de costa larga y corta por tipología morfológica para la costa de 2011.

Fuente: epígrafe 4.3.2 de esta Tesis Doctoral.

Como puede apreciarse en la tabla anterior, la longitud de playas expuestas asociadas a la línea de costa de 2011 es de 620 Km. que suponen casi el 70% del frente costero de Andalucía (917 Km.). Este valor porcentual se distribuye de forma diferente en la fachada atlántica y la mediterránea. Teniendo en cuenta el límite entre ambas fachadas establecidos en este trabajo (Punta de Tarifa), las playas son más frecuentes en la fachada atlántica (252 Km.) donde representan el 80% del frente costero, mientras que este porcentaje se reduce en la fachada mediterránea donde los 380 Km. de playas expuestas representan el 63%.

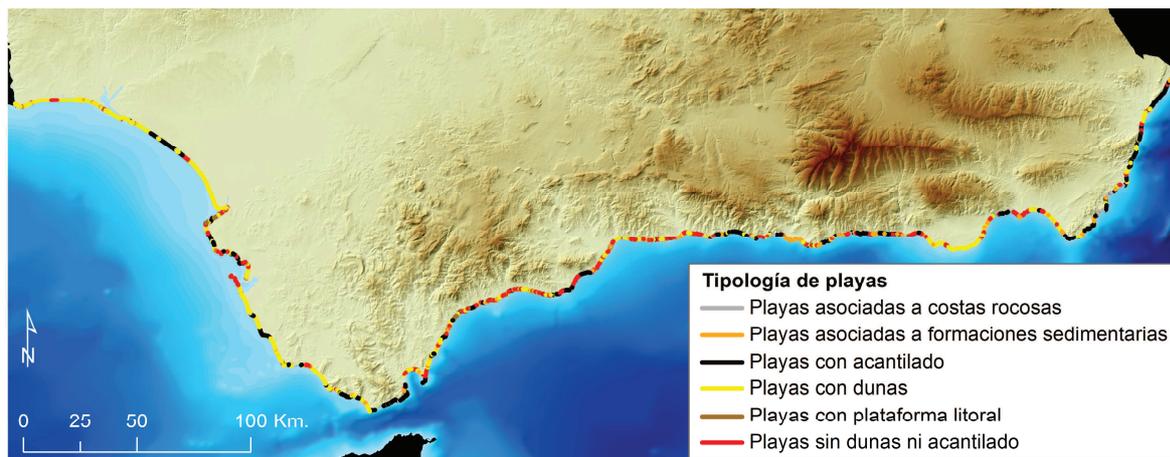


Figura 1.11. Tipología de playas andaluzas.
Fuente: elaboración propia.

Como puede apreciarse en la Figura 1.11, los 620 Km. de playas expuestas están asociadas a tipologías muy diferentes:

En la vertiente atlántica predominan las playas asociadas a complejos dunares y en pequeña proporción a sectores acantilados, la mayor parte de ellos de materiales muy deleznable (los acantilados sobre las formaciones arenosas y mantos eólicos de El Asperillo), bien materiales postorogénicos (acantilados de Conil de la Frontera o Barbate) o materiales del complejo del Campo de Gibraltar, a veces con plataformas de abrasión. Si se examina la Figura 1.12 donde se representan las playas expuestas junto a las formaciones litorales de la provincia de Huelva y Cádiz a la que están asociadas, puede encontrarse la explicación a estas características.

En la costa de Huelva occidental, las playas se asocian a islas-barrera evolucionadas y flechas litorales con sus correspondientes sistemas dunares que protegen los amplios espacios de marismas mareales ubicados entre éstos y el acantilado relicto Flandriense. En la costa oriental onubense se identifican 2 tramos diferenciados: (i) un primer sector (Huelva-Matalascañas) donde las playas se ubican al pie de un acantilado activo, generado por el proceso de erosión de los procesos marinos sobre los materiales arenosos que sustentan el amplio sistema de mantos eólicos de El Abalarío; (ii) un tramo final asociado a las diferentes fases de progradación de la flecha de la Punta del Malandar que aísla del oleaje a las marismas fluvio-pluviales de Doñana y sobre la que se desarrolla un espectacular sistema de dunas móviles.

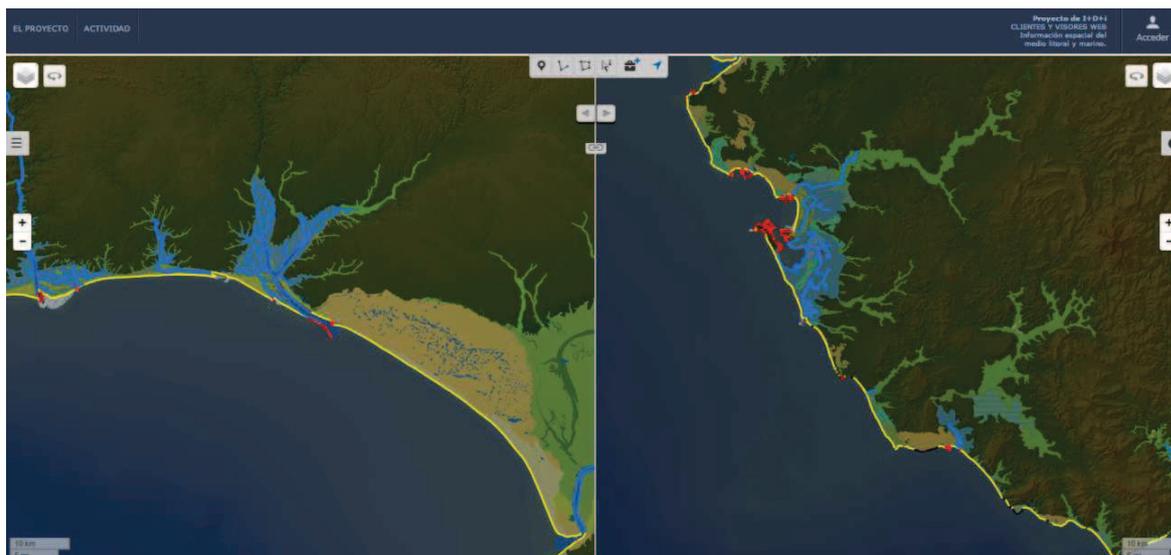


Figura 1.12. Playas expuestas y formaciones litorales en la vertiente atlántica.
Fuente: elaboración propia a partir del Visor del Grupo de Investigación.

En la provincia de Cádiz también se observa un predominio mayoritario de las playas expuestas aunque, puntualmente en el frente costero, se observan formaciones acantiladas sin playas asociadas (Barbate, Conil de la Frontera, etc.) y sectores muy antropizados en el entorno de la Bahía de Cádiz. Al norte de la ciudad de Cádiz las playas expuestas suelen estar asociadas a microacantilados labrados sobre formaciones fluvio-coluviales, en ocasiones cubiertas por mantos eólicos que alcanzan la costa. En la Bahía de Cádiz, las playas se asocian a las formaciones de islas-barrera, flechas litorales y cordones arenosos que cierran la desembocadura del Guadalete o conectan los promontorios (“islas”) de Cádiz y San Fernando, favoreciendo el desarrollo de las marismas mareales de la Bahía. Desde la playa de La Barrosa hasta Conil de la Frontera, las playas se asocian a formaciones dunares, materiales fluvio-coluviales o depósitos del relleno postorogénicos de la Depresión del Guadalquivir que, en ocasiones, generan acantilados y playas encajadas en su tramo final. A partir de este sector, las playas, generalmente también con duna costera asociada, se ubican en las depresiones labradas sobre las formaciones más blandas de las series flychoides del Campo de Gibraltar (ya en el entorno de las Béticas), separadas habitualmente por acantilados en los cabos que generan las sierras constituidas por materiales más compactos y duros (areniscas del Algibe) con disposición ortogonal a la línea de costa.

En la **vertiente mediterránea**, las playas expuestas son dominantes, pero en menor medida que en la atlántica. La causa es la proximidad de los relieves de los Sistemas Béticos, que hace que las formaciones litorales a las que están asociadas sólo

ocupen una estrecha banda que recorre todo el frente costero. La principal diferencia en la tipología de playas, en relación a la vertiente atlántica, se debe a la importante presencia de playas sin dunas ni acantilado asociadas a los importantes tramos ocupados por infraestructuras costeras (paseos marítimos, escolleras...) derivados de la importante urbanización ligada al fenómeno turístico (especialmente en la Costa del Sol), así como la mayor presencia de playas asociadas a acantilados por la proximidad de los relieves de las Béticas.

En el sector occidental de la vertiente mediterránea (Tarifa-río Guadalfeo) (ver Figura 1.13), las playas expuestas se asocian, en un primer subsector (Tarifa-Algeciras), a las pequeñas calas entre los acantilados y costas rocosas que lo caracterizan, así como a las formaciones arenosas litorales (islas-barrera y dunas) que cierran las marismas del río Palmones en el interior de la Bahía de Algeciras. La desembocadura del río Guadiaro proporciona los sedimentos que alimentan a las formaciones dunares al sur de la misma y a las playas con dunas que se ubican en dirección sur hasta el promontorio calizo de Gibraltar. Desde la desembocadura del río Guadiaro hasta Málaga, la costa se caracteriza, exceptuando la presencia puntual de acantilados bajos asociadas a los cabos presentes, por la presencia de una estrecha banda de sedimentos fluvio-coluviales que separa la costa de las primeras estribaciones Béticas. Las formaciones dunares originales asociadas a las playas han desaparecido, en su mayor parte, por la ocupación antrópica ligada al desarrollo turístico. En la actualidad, la presencia de dunas se debe a la protección de algunos enclaves (Cabopino) o se limitan a estrechos cordones de algunos metros de anchura. La presencia de la desembocadura del río Guadalhorce rompe la configuración antes citada para continuar por la Costa del Sol oriental (igualmente con playas sin dunas por la ocupación antrópica). La presencia de zonas acantiladas (Maro-Cerro Gordo, por ejemplo) separan los siguientes sectores con playas expuestas que se asocian a los deltas de los ríos Vélez y Guadalfeo, así como a las formaciones fluvio-coluviales de Calahonda.

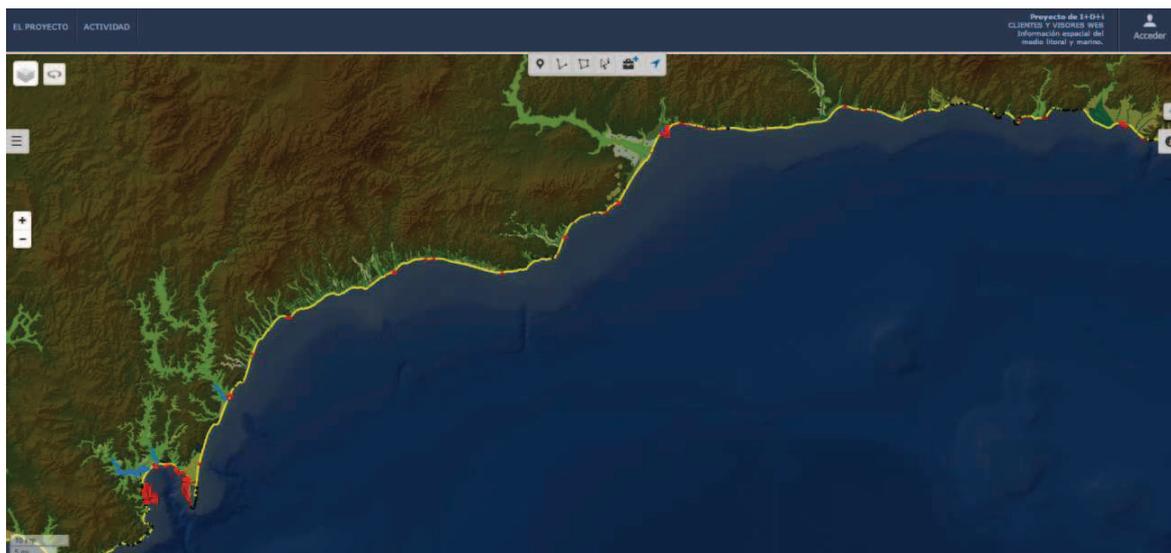


Figura 1.13. Playas expuestas y formaciones litorales en el sector occidental de la vertiente mediterránea.

Fuente: elaboración propia a partir del Visor del Grupo de Investigación.

En el sector oriental de la vertiente mediterránea (río Guadalfeo-Pulpí), las playas expuestas se asocian a una mayor diversidad de formaciones litorales (Figura 1.14). En un primer subsector se caracterizan por asociarse a los piedemontes de los relieves Béticos, desarrollándose playas estrechas, generalmente sin dunas asociadas, hasta llegar a las playas asociadas al delta del río Adra. A continuación se ubica el subsector del Campo de Dalías, donde las playas se adosan a las amplias formaciones litorales arenosas que lo caracterizan (flechas litorales, cordones dunares, etc.), junto a amplios sistemas dunares asociados excepto en el frente costero de los núcleos turísticos, donde han desaparecido por los procesos de ocupación urbana.

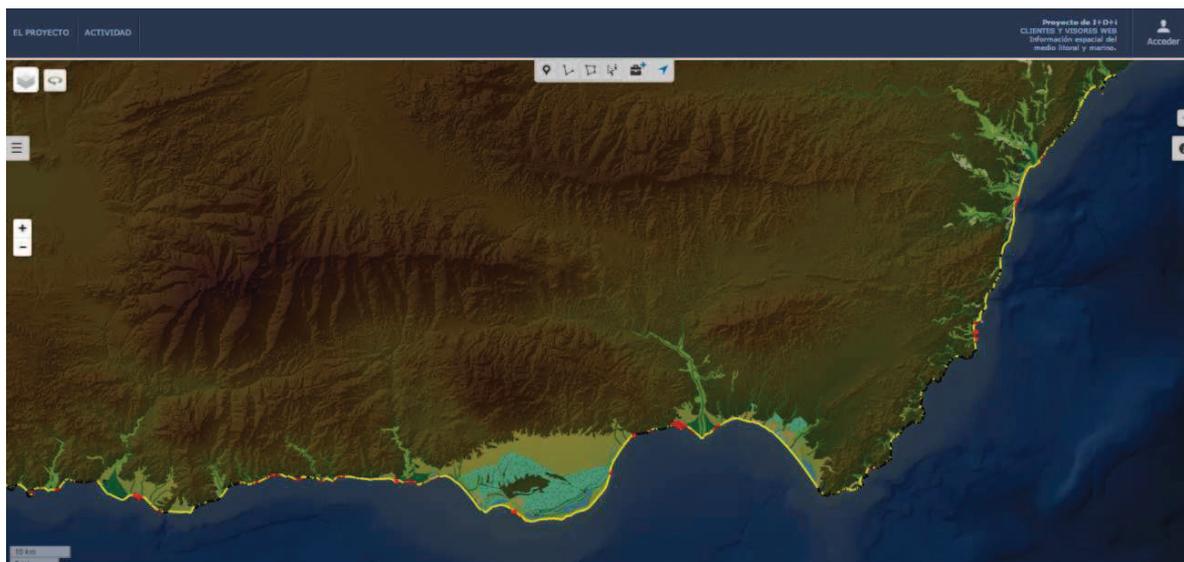


Figura 1.14. Playas expuestas y formaciones litorales en el sector oriental de la vertiente mediterránea.

Fuente: elaboración propia a partir del Visor del Grupo de Investigación.

Un tramo acantilado separa el Campo de Dalías de las formaciones fluviales ligadas al delta del río Andarax, donde predominan las playas sin dunas por la presencia antrópica. Sin embargo, las playas con dunas asociadas vuelven a ser visibles en el subsector delta del río Andarax-Cabo de Gata, en estos casos asociadas a formaciones fluvio-coluviales, mantos eólicos y antiguas terrazas marinas. La fachada oriental de la provincia almeriense refleja la menor proporción de playas de todo el litoral andaluz por la presencia de dos amplios sectores acantilados, asociados a los materiales volcánicos del Gata en el sector meridional y a las costas rocosas de la sierra de Cabrera al norte. En estos sectores, la presencia de playas expuestas se reduce a pequeñas calas (Genoveses, Mónsul, etc.) ubicadas de forma alternante entre estos sectores acantilados. Por último, el sector central de la fachada oriental almeriense se caracteriza por la presencia de playas asociadas a las formaciones fluviales del delta del río Almanzora y a las formaciones fluvio-coluviales y antiguas terrazas marinas existentes desde la desembocadura de éste hasta Carboneras.

1.4.4.- UNIDADES FISIAGRÁFICAS Y TRAMOS

Dada la amplitud de la zona de estudio, era necesario algún criterio para compartimentarla en unidades menores que fuesen consistentes desde la óptica de los procesos erosivos que controlan los cambios en la línea de costa y, por lo tanto, que proporcionasen un contexto espacial para analizar o describir los resultados de los cálculos realizados sobre tasas de erosión o acumulación.

Por otra parte, los procesos erosivos en las playas responden básicamente a un balance sedimentario (ver epígrafe 2.1) entre las entradas de sedimentos al sistema litoral y las salidas del mismo comandadas por los agentes de la dinámica litoral, esencialmente el oleaje. Esta es la razón por la que en los estudios de procesos erosivos en playas actuales (especialmente desde la ingeniería) se ha adoptado el término de **“Unidades Fisiográficas” desde la perspectiva dinámica** (Ojeda et al., 2001).

Desde el punto de vista de la dinámica litoral, las **Unidades Fisiográficas** se consideran sectores sedimentarios independientes, adoptando como límite cualquier barrera artificial (puertos, espigones, diques...) o natural (acantilados o cualquier formación natural) que impida el libre intercambio de sedimentos entre dicho sector y sus adyacentes. Para la definición rigurosa de estos límites es necesario realizar un estudio detallado no sólo de las entradas o salidas de sedimentos del sistema, sino un análisis cuantitativo de la carga sedimentaria movilizada por deriva longitudinal con el uso de modelos numéricos y la identificación de células de transporte (Malvárez et al., 2004; Guisado et al. 2014; Guisado y Malvárez, 2015a). Este análisis riguroso y modelización numérica escapan a los objetivos de esta Tesis y conllevaría, además, un inabordable esfuerzo de procesamiento de datos.

Sin embargo, si se ha considerado oportuno realizar una primera aproximación a estos límites a partir de la bibliografía existente y la experiencia previa del Grupo de Investigación. Como resultado de este análisis bibliográfico y conocimiento previo se ha subdividido el litoral andaluz en 22 Unidades Fisiográficas utilizando como límites aquellos elementos antrópicos (puertos y grandes diques y espigones) o sectores acantilados que, o bien la bibliografía había asegurado que constituyen una barrera total al tránsito sedimentario (dique Juan Carlos I en Huelva, Puerto de Málaga, Punta de Tarifa, etc.) o bien se podía estimar que funcionaba como tal por la presencia de acantilados a plomo y batimetrías profundas cercanas a la costa (ver Figura 1.15). Es conocido que algunas Unidades Fisiográficas incluyen sectores acantilados con multitud

de calas o pequeñas ensenadas (sector meridional de Cabo de Gata, por ejemplo) cuyas playas encajadas constituyen Unidades Fisiográficas de menor entidad y que algunos límites posiblemente en la actualidad ya no constituyan barreras totales (determinados puertos) por la acumulación reciente de sedimentos. Sin embargo, se ha considerado que es la forma más coherente de presentar y analizar los resultados de los cálculos sobre tasas realizado en esta Tesis.



Figura 1.15. Delimitación de Unidades Fisiográficas del litoral andaluz.
Fuente: elaboración propia.

El primer límite definido fue la **Punta de Tarifa**, donde el brusco giro de la costa hacia el Estrecho de Gibraltar, en conjunción con el puerto de Tarifa, constituyen una barrera total, estableciéndolo como **límite entre la vertiente atlántica y mediterránea**. A partir de este límite, las 22 Unidades Fisiográficas definidas recorren la totalidad del litoral de Andalucía (**8 Unidades en la vertiente atlántica y 14 Unidades en la mediterránea**). Estas unidades se han agrupado espacialmente en **6 Tramos costeros (2 Tramos en la fachada atlántica y 4 en la mediterránea)** para facilitar la descripción y análisis de los resultados (ver Figura 1.16).

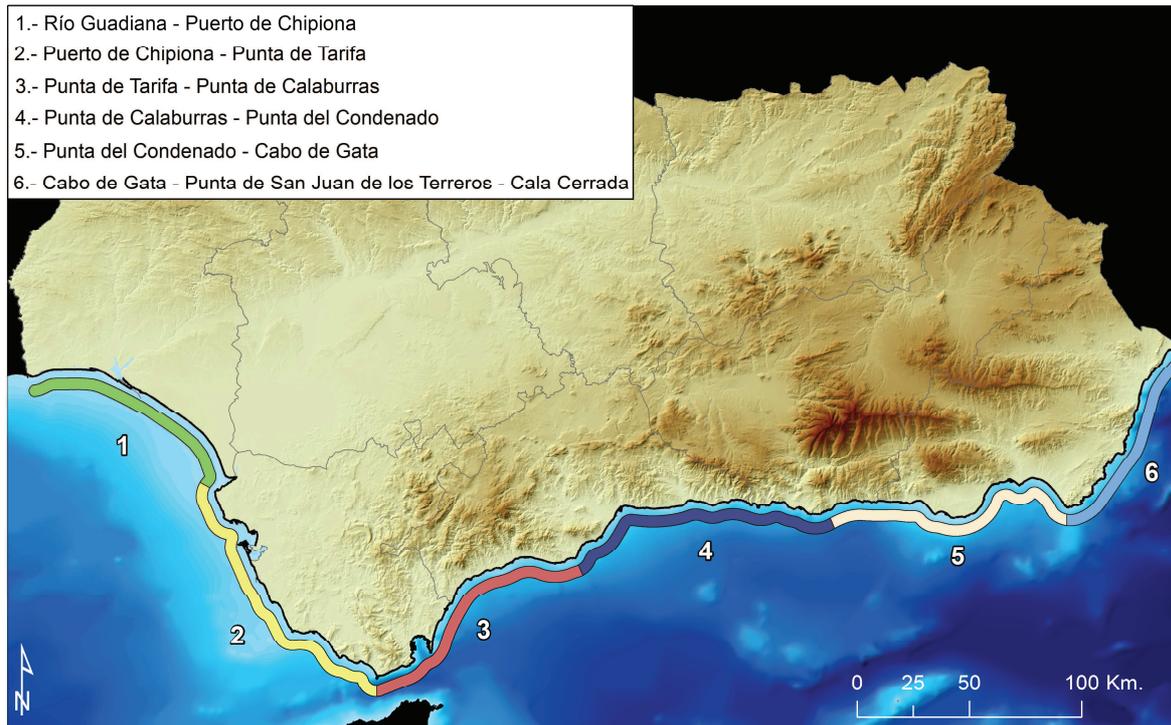
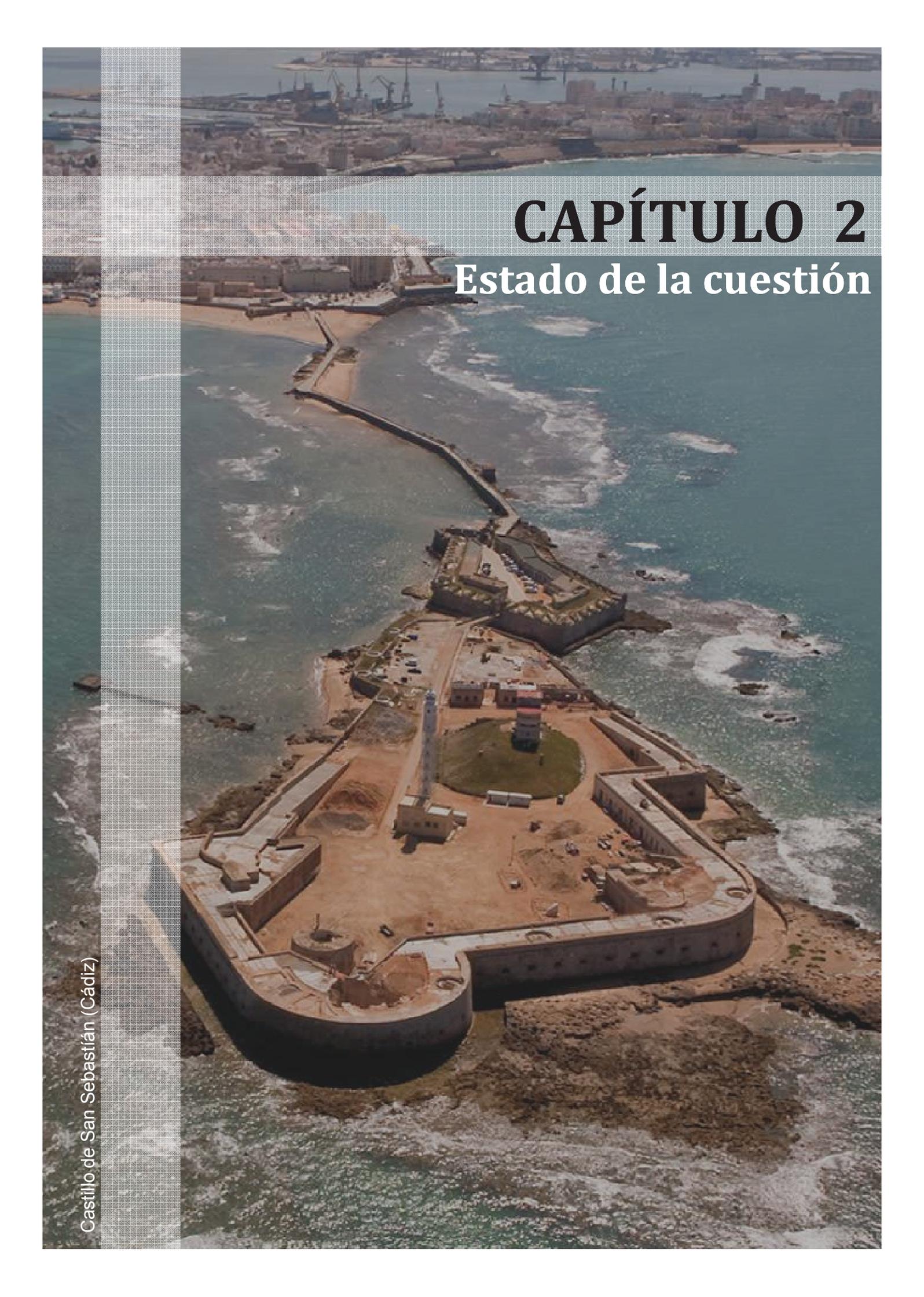


Figura 1.16. Delimitación de Tramos del litoral andaluz.
Fuente: elaboración propia.

Estas **Unidades Fisiográficas, Tramos costeros y sus límites** se han incluido en el **geovisor web** desarrollados en la Tesis, así como en la **base de datos espacial** creada, de tal forma que todos los cálculos asociados a transectos o puntos incluyen el Tramo y la Unidad Fisiográfica de referencia. Esta estructura en la base de datos y el geovisor web facilitarán a los científicos y usuarios de los mismos realizar selecciones a partir de estas Unidades y Tramos, así como el cálculo de indicadores (tasas medias, retrocesos medios, etc.) o representaciones gráficas de forma interactiva.



CAPÍTULO 2

Estado de la cuestión

Castillo de San Sebastián (Cádiz)

CAPÍTULO 2

ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1.- EROSIÓN COSTERA Y PLAYAS EXPUESTAS: TERMINOLOGÍA, PROCESOS Y DINÁMICA

2.1.1.- EROSIÓN COSTERA Y PLAYAS EXPUESTAS

A día de hoy son numerosas las publicaciones y trabajos existentes acerca del concepto de **erosión costera** y su cuantificación en las playas. Íntimamente ligada al concepto de “balance sedimentario litoral” (Bowen e Inman, 1966; Komar, 1976) y considerada y analizada tradicionalmente en la literatura de geomorfología litoral (Pardo, 1991; Viciano, 1998) y de riesgos naturales (Lechuga, 1995; De Andrés y Gracia, 2002; Wisner et al., 2004; Boruff et al., 2005; Bryant, 2005; Douglas, 2007; Baron et al., 2014), la erosión costera dispone de un abanico metodológico tan extenso como características y objetivos (erosión de playas, de acantilados, de marismas mareales, etc.) se persiguen con cada trabajo realizado.

Son varios los procesos que pueden modificar morfología de la costa alterando la posición de los sedimentos o el sustrato terrestre preexistente. Cuando estos procesos en un sector costero dado tienen capacidad de **detraer sedimentos en una cantidad superior a la de acumularlos**, se habla de **erosión costera** (Ojeda, 2015).

Del mismo modo que ocurre con la erosión costera, las **playas** han recibido diferentes definiciones desde distintas disciplinas (Geomorfología, Turismo, Ingeniería,

Legislación, etc.) cada una de las cuales ponen el énfasis en diversos aspectos (capacidad de carga, morfología, sedimentología, hidrodinámica, etc.). Si bien no es objeto de esta Tesis Doctoral realizar un análisis en profundidad del concepto de éstas, sí que resulta necesario una delimitación y definición clara del que es el objeto de estudio: las *playas expuestas*, los elementos que la componen y los procesos que actúan sobre ella.

Así, se asumirá en esta Tesis Doctoral la definición de playa realizada por el Coastal Engineering Research Center, CERC (1984), como: **“la acumulación de sedimento no consolidado (arena, grava o canto rodado) que se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje en temporal y pleamar viva y una profundidad que corresponde a la zona donde deja de producirse un movimiento activo de sedimentos debido a la acción del oleaje”**.

Además de por su amplia difusión y uso, se asume esta definición de playas porque engloba factores tan importantes como la **identificación de los límites de la playa**, todavía hoy en proceso de acuerdo y aceptación ya que su carácter dinámico, influenciado principalmente por la acción del oleaje y, en menor medida, por la acción combinada del viento y otros agentes meteorológicos y antrópicos, impide una demarcación estable de los límites de la misma. Así, se recoge de esta definición que las playas **se prolongan por debajo del nivel del mar** hasta donde el oleaje tiene capacidad para movilizar el sedimento que las constituye (playa sumergida o *shoreface*). Es lo que suele llamarse “profundidad de cierre” y, tal y como ya se recoge en Ojeda (2015), la playa que se observa emergida en marea baja es sólo una parte de la formación sedimentaria que llamamos “playa” (la punta del iceberg), siendo el lugar donde se dan los procesos críticos para su dinámica y estabilidad. Así, el carácter dinámico supone la agrupación dentro del término “playa” de formaciones litorales diversas, que van desde las sumergidas permanentemente (barras submarinas) hasta las afectadas exclusivamente por pleamares excepcionales (playa alta), pasando por formaciones intermedias, generadas fundamentalmente por la **acción del oleaje y la oscilación mareal diaria** (Ojeda et al., 2001). El **límite superior**, también influenciado por el oleaje, queda definido como el nivel de la lámina de agua alcanzado durante los **mayores temporales y mareas vivas** que, al impedir el desarrollo de la vegetación costera, definen el límite de la playa alta o seca (*backshore*). Generalmente, como se verá más adelante, cuando se analizan las playas desde la perspectiva de la dinámica sedimentaria, se suelen incluir **la duna costera** como una unidad geomorfológica

complementaria, aunque íntimamente unida al balance sedimentario de la playa (razón por la que se incluyen en el dominio público marítimo terrestre en la legislación de Costas española de 1988 y 2013). Este carácter complementario hace de la duna costera un elemento muy analizado en estudios de erosión litoral (Vasseur y Hequette, 2000; Pye y Blott, 2008; Van Thiel de Vries, 2009; Sanjaume y Gracia, 2011; Gómez, 2014).

A pesar de su gran importancia, casi todos los estudios de erosión costera se centran en la playa emergida y, en menor medida, parcialmente en la sumergida. Sólo muy recientemente, escasos estudios abordan la playa completa. Con la implantación de los sistemas de altimetría láser aerotransportada *Light Detection and Ranging (LiDAR)*, comienzan a aparecer los primeros estudios morfodinámicos sobre la playa completa (ver apartado 2.3.2).

Tal y como ya se recoge en la definición del CERC, las playas son acumulaciones de **materiales no consolidados** en zonas litorales y su morfología está básicamente controlada por el **oleaje** (playas expuestas). Las características de estos sedimentos favorecen que las playas estén en constante ajuste morfosedimentario, en función de las características hidrodinámicas de aquél (altura, período, etc.), cambiando su perfil morfológico para convertirse en uno de los mecanismos más eficaces para disipar la energía que trasladan las olas incidentes (Ojeda, 2015). Por otro lado la acción del oleaje y de la marea dota a las playas de una enorme dinamicidad, tanto desde el punto de vista longitudinal (deriva litoral) como transversal (cambios del perfil de playa). Todo ello hace relativamente difícil la cuantificación de los cambios producidos en la playa, debido a la dificultad de encontrar dos perfiles dinámicamente comparables.

La **erosión de playas** hace referencia, por tanto, a la **disminución del volumen sedimentario** que las constituye, debido bien a una disminución en la entrada de sedimentos (*inputs*), a un aumento en la salida (*outputs*) o a la alteración del tránsito de éstos (longitudinal o transversal). Estos sedimentos pueden ser transportados y redistribuidos por corrientes litorales longitudinales o transportado mar adentro por corrientes transversales (Trenhaile, 1997). Esta disminución de volumen de sedimentos es un proceso tridimensional, pudiéndose traducir en un **retroceso de la línea de costa** (bidimensional). En este caso, el resultado es el avance del mar sobre el continente, desplazando la línea de costa hacia el interior de forma temporal o permanente (Del Río, 2007).

Antes de comenzar con los procesos y causas de la erosión costera se abordará, a modo informativo, un epígrafe terminológico con el fin de definir los principales elementos geomorfológicos e hidrodinámicos que componen las playas y que, por tanto, serán utilizados a lo largo de la presente Tesis Doctoral.

2.1.2.- TÉRMINOS GEOMORFOLÓGICOS E HIDRODINÁMICOS PARA LA DEFINICIÓN DE LAS PLAYAS EXPUESTAS

La Figura 2.1 muestra la terminología utilizada para definir los diferentes elementos de una playa. Éstos pueden hacer mención a su componente geomorfológica o hidrodinámica.

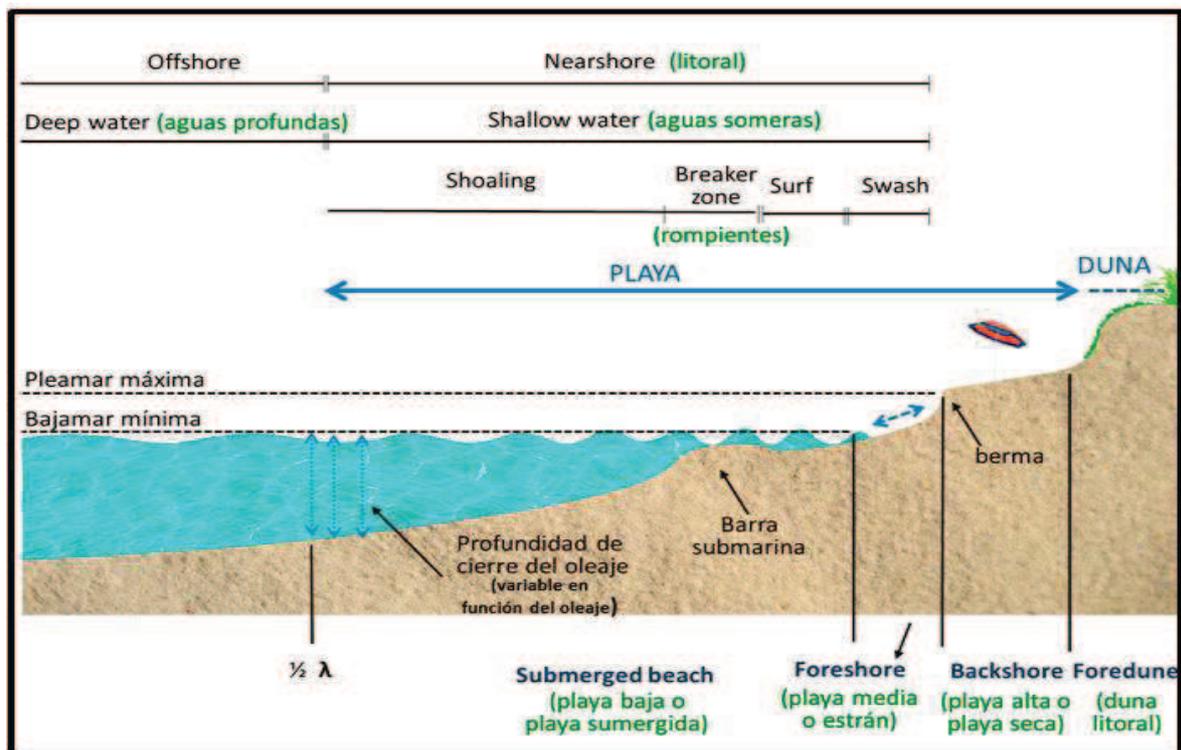


Figura 2.1. Principales componentes geomorfológicos e hidrodinámicos de una playa.
Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista geomorfológico es posible identificar los siguientes elementos:

- ⇒ Duna costera (*foredune*): acumulaciones sedimentarias arenosas que se encuentran adosadas a la playa alta, si bien antiguos depósitos arenosos eólicos pueden estar desconectados actualmente de su área fuente debido a cambios eustáticos o epirogenéticos.

- ⇒ Playa alta o seca (*backshore*): zona del perfil de playa comprendida entre el límite continental superior de la playa (coincidente con el nivel máximo de la lámina de agua en condiciones energéticas extraordinarias del oleaje) y el nivel alcanzado por el mismo en pleamar en condiciones energéticas normales. Este segundo límite suele coincidir con el borde de la berma o el inicio del frente de playa.
- ⇒ Playa media, intermareal o estrán (*foreshore*): zona del perfil de playa que marca el contacto entre la tierra emergida y el mar en períodos energéticos ordinarios del oleaje. Queda acotada por varias líneas de orilla (bajamar y pleamar, así como todas sus posiciones intermedias), correspondientes a las oscilaciones mareales diarias.
- ⇒ Playa baja, submarina o zona litoral (*shoreface*): zona comprendida entre la línea de bajamar y toda aquella superficie permanentemente sumergida sobre la que actúan los procesos litorales (principalmente la deriva litoral y transporte litoral transversal ligados al oleaje). La anchura de la playa baja depende de las condiciones del oleaje, promediado durante un año (Mangor, 2008). El límite inferior viene marcado por la profundidad a la que el oleaje incidente deja de tener efecto sobre el sedimento basal, comúnmente aceptada como la mitad de la longitud de onda de la ola significativa (profundidad de cierre).
- ⇒ Berma: zona semihorizontal de la playa seca formada por la acumulación de sedimento debida al oleaje, que presenta un fuerte cambio de pendiente en el lado del mar hacia el frente de playa, denominado borde de la berma. Cuando, tras una temporada de gran actividad del oleaje, se sucede un período de calma, una nueva berma (berma de verano) se puede añadir a la anterior (berma de invierno), con un nivel horizontal inferior debido a un menor ascenso del oleaje. Marcando la separación entre las dos bermas puede haber una zona de mayor pendiente, correspondiente al frente de playa de invierno.
- ⇒ Cresta y surco (*ridge and runnel*): se trata de formaciones sedimentarias que alternan crestas de avance hacia la playa (*ridge*) y zonas deprimidas (*runnel*) entre el límite de bajamar y la berma de la playa alta, ubicándose por tanto en la playa media o zona intermareal. Se trata de formaciones sedimentarias de transición tras un temporal, ya que el oleaje de baja energía posterior comienza a trasladar las barras submarinas hacia la playa emergida.
- ⇒ Barra submarina: acumulación sedimentaria submarina, generalmente paralela a la costa y situada en la zona de rompiente (*breaker zone*) como

consecuencia de la rotura del oleaje, ubicándose, por tanto, en la playa sumergida. Su morfología y extensión responden a una adaptación constante a las condiciones actuales del oleaje y la marea, por lo que suele ser una formación muy dinámica. El movimiento natural de la misma (transversal a la costa) suele ser hacia el mar en períodos de oleaje de alta energía (temporales) y hacia la costa en períodos de bonanza climática.

Desde el punto de vista hidrodinámico es posible identificar los siguientes elementos:

- ⇒ Aguas someras/aguas profundas (*shallow water/deep water*): quedan definidas por el límite de profundidad a partir del cual el oleaje incidente se deforma como consecuencia del asomeramiento costero (*shoaling*), provocando la remoción sedimentaria del fondo marino y dando lugar a los principales procesos litorales. Tal y como se comentó anteriormente, el límite viene determinado por la mitad de la longitud de onda de la ola significativa (profundidad de cierre).
- ⇒ Zona de rompiente (*breaker zone*): describe aquella zona inmediatamente próxima a la costa donde la ola colapsa y comienza su proceso de rotura. Dadas las condiciones específicas de cada ola, la zona de rompiente varía instantáneamente de amplitud.
- ⇒ Zona de *surf*: describe la extensión abarcada por la acción de la ola en su proceso de rotura. Al igual que la zona de rompiente, la zona de surf depende exclusivamente de las condiciones específicas de cada ola, variando su amplitud.
- ⇒ Zona de *swash*: zona donde tiene lugar el proceso de vaivén del agua aportada por la ola una vez finalizado su proceso de rotura sobre el frente de la playa (estrán y playa seca).

Dada la capacidad del oleaje para movilizar sedimentos, se estima que entre el 80 y el 90% del transporte sedimentario litoral anual se lleva a cabo dentro de la zona de rompiente, *surf* y *swash* (Mangor, 2008).

2.1.3.- PROCESOS Y DINÁMICA EN LAS PLAYAS EXPUESTAS

Una vez descritos los componentes de la playa, en este apartado se realiza el análisis del conjunto de procesos que posibilitan y explican el movimiento de los sedimentos en una playa. Generalmente, y de forma artificial, se suelen dividir entre aquellos procesos que controlan los movimientos de los sedimentos hacia el continente o hacia altamar haciendo modificar su perfil transversal (dinámica transversal) y aquellos que controlan los movimientos a lo largo del perfil longitudinal de la playa –la deriva litoral- (dinámica longitudinal).

La dinámica transversal responde a la movilización sedimentaria en sentido de la pendiente transversal de la playa. Se explica por la capacidad energética del oleaje incidente, que modifica la disposición de los sedimentos y, éstos a su vez, condiciona los patrones de asomeramiento y rotura de las olas (relación recíproca). Los perfiles transversales buscan el denominado “perfil de equilibrio” (Dean, 1991; Pilkey et al., 1993; Thieler et al., 1995; Bernabeu et al., 2001; Medina et al., 2002; Coelho y Veloso-Gomes, 2006), modelo teórico considerado como aquella morfología que alcanza un perfil de playa expuesto a unas condiciones de oleaje constantes y compuesto por una granulometría sedimentaria determinada (Larson, 1991).

En este sentido, las playas alargan su perfil transversal durante los temporales (tomando sedimentos de la playa seca y dunas para depositarlas en la playa sumergida) y fuerzan una rotura temprana del oleaje aguas adentro, facilitando la disipación la energía incidente a lo largo del perfil.

A grandes rasgos, existen 3 tipos fundamentales de morfologías que reflejan la adaptabilidad de la playa a las condiciones hidrodinámicas específicas del oleaje (ver Figura 2.2):

- ⇒ **Perfil de calma:** También denominado en el argot geomorfológico “perfil de verano o bonanza”, describe una acumulación sedimentaria significativa en la playa seca, como consecuencia de la acción continuada del oleaje de baja energía. Presenta una pendiente más o menos significativa en el estrán, decreciendo a lo largo de la playa sumergida. La zona de rompiente del oleaje tiene escaso recorrido debido a la inclinación de la playa media, remontando inmediatamente la ola en forma de *run-up*.

- ⇒ **Perfil de tempestad:** también denominado “perfil de invierno o de temporal”, responde a condiciones de oleaje de alta energía, cuando el nivel del mar supera la pleamar media debido a la ocurrencia de algún evento meteorológico extraordinario (*surge*). El oleaje invade la playa seca y, en algunos casos, las formaciones inmediatamente posteriores a la misma, movilizandolos grandes cantidades de sedimento y acumulándolos en la playa sumergida en forma de barra o conjunto de barras submarinas dispuestas paralelamente a la costa. La pendiente generada en el límite máximo alcanzado por la lámina de agua contrasta con un estrán de perfil prácticamente llano, donde la amplia superficie de asomeramiento provoca la ruptura prematura del oleaje, reduciendo las corrientes de resaca –*backwash*– (Vidal et al., 1995).
- ⇒ **Perfil de adaptación:** describe el proceso de movilización *onshore* de sedimentos de la playa submarina hacia la playa media y alta en los períodos de oleaje de bonanza. Las barras submarinas son transportadas hacia la costa gracias al oleaje de baja energía (Roelvink y Reniers, 2011). Durante el proceso de anexión a la línea de costa, las barras submarinas afloran progresivamente a la superficie durante la bajamar, generando una morfología de crestas y surcos (*ridge and runnel*) en la zona de playa media.

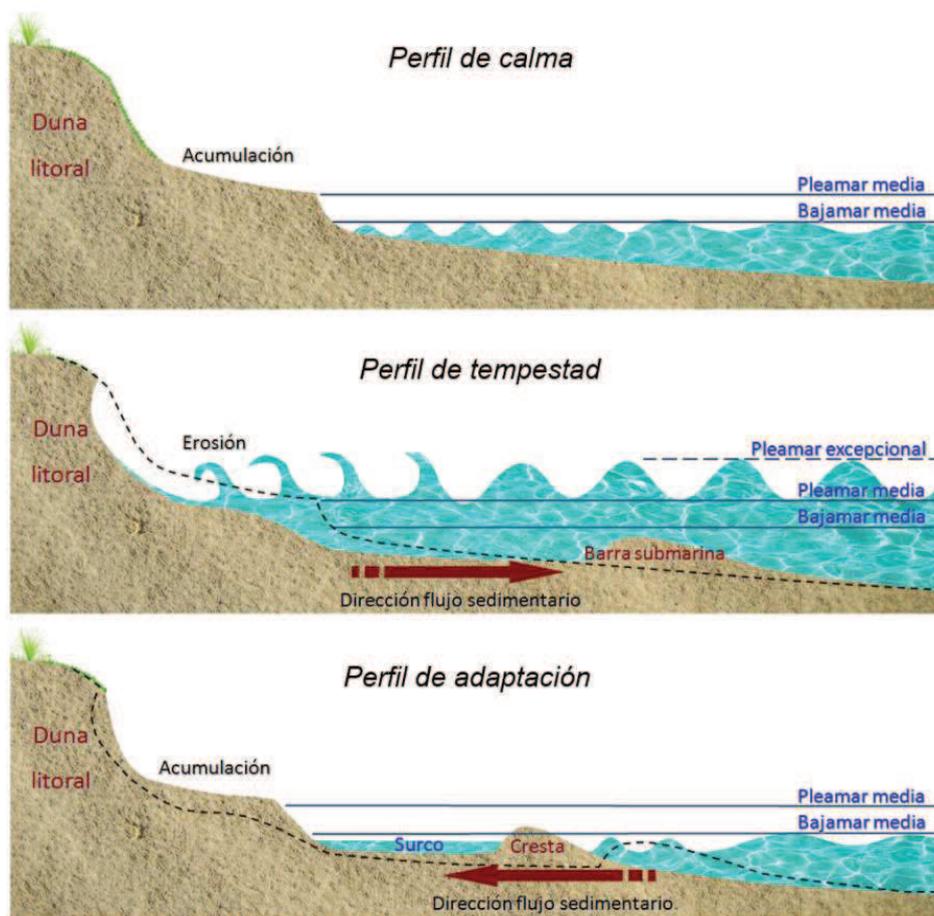


Figura 2.2. Dinámica transversal de las playas.
Fuente: elaboración propia.

Un aspecto muy importante a destacar de esta dinámica transversal es el claro reflejo del continuo ajuste morfodinámico del perfil transversal a las características del oleaje. En relación a los objetivos de esta Tesis Doctoral, el continuo ajuste morfodinámico tiene 2 efectos importantes:

- ⇒ Dada la necesidad de elección de un indicador de la línea de costa (*proxy*) para el cálculo de tasas, si el elegido se encuentra dentro del perfil activo (por ejemplo, marca húmeda del oleaje), dificulta en gran medida su comparación con otra fecha, al ser muy difícil la coincidencia de dos perfiles en estado morfodinámico semejante.
- ⇒ La presencia de construcciones o infraestructuras (paseos marítimos, muros de contención...) que ocupen la playa alta o la duna costera (*foredune*) imposibilitan que la playa pueda ampliar su perfil para disipar la energía de temporales, amplificando los efectos erosivos de los mismos.

La **dinámica longitudinal**, por su parte, se debe al efecto del oleaje refractado por el proceso de adaptación a la batimetría costera en su propagación hacia la orilla (ver Figura 2.3). El sentido dominante del transporte longitudinal en la costa (deriva), por lo tanto, está fuertemente controlado por el ángulo de aproximación del oleaje dominante en cada tramo costero (Carter, 1991). Como el oleaje es variable a lo largo del año, se habla de **deriva dominante o neta**, aludiendo al sentido del transporte resultante tras realizar un balance sedimentario con todas las direcciones de aproximación del oleaje que tienen capacidad de transportar sedimentos longitudinalmente en la costa.

La cuantificación y modelización teórica de su comportamiento tanto en zonas expuestas (Bijker, 1969; Dean, 1973; Balica et al., 2012) como protegidas (Greenwood y McGillivray, 1978), ha sido objeto de estudio durante décadas en el campo de la ingeniería costera civil. En este sentido, ha abarcado desde análisis pioneros con escasas variables, como el período de ola, la granulometría sedimentaria, la pendiente de la playa o la carga de fondo (Van Rijn, 1984; Wright et al., 1985) hasta los actuales complejos modelos multivariables anidados, donde cada vez es considerada en mayor medida la incidencia antrópica (Chandramohan et al., 2001; Montesdeoca et al., 2001; Van Rijn, 2011).

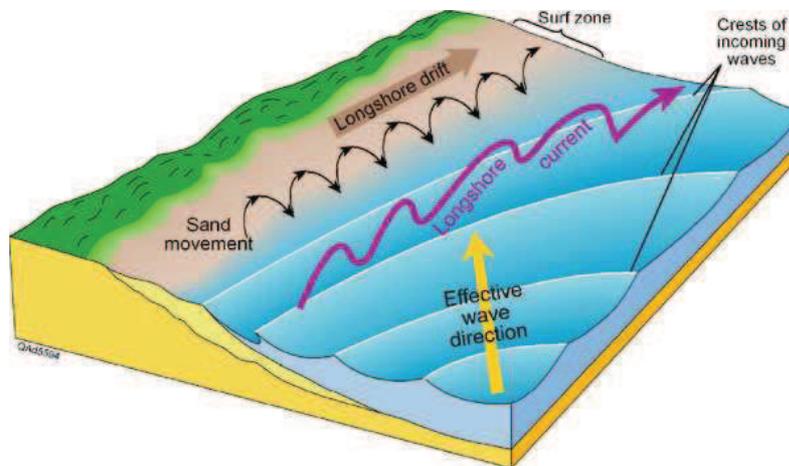


Figura 2.3. Esquema de funcionamiento de la deriva litoral.
Fuente: www.beg.utexas.edu

Del comportamiento del tránsito longitudinal de sedimentos en la playa (deriva) resultan 2 aspectos importantes de cara a los objetivos del presente trabajo (cálculo y análisis de tasas).

- ⇒ La caracterización de las derivas litorales es esencial para la definición de las **Unidades Fisiográficas** en playas (todo aquel tramo costero interconectado desde el punto de vista de la dinámica sedimentaria), cuyos límites son esenciales para el análisis de los resultados de las tasas. La distribución de las derivas dentro de cada unidad fisiográfica costera explica gran parte de la génesis de las formas litorales presentes en ella y de los procesos de erosión y acumulación.
- ⇒ La presencia de cualquier **elemento antrópico** (puertos, diques, espigones...) en una unidad fisiográfica con una clara deriva dominante, supone una alteración antrópica de los procesos de erosión y acumulación. De hecho, dada la gran presión antrópica en la costa andaluza, la presencia de estos elementos generará un sector acumulativo en el tramo aguas arriba de la deriva y un claro sector regresivo (por el efecto barrera) en el tramo aguas abajo de la misma.

2.2.- CAUSAS DE LA EROSIÓN DE PLAYAS: ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES

Los procesos de erosión costera, especialmente de las playas, han existido y actuado a lo largo de toda la historia geológica de la Tierra desde la aparición del agua en la misma hace miles de millones de años (Alexander et al., 2012). Sin embargo, para analizar sus causas, es necesario contemplar **diferentes escalas espacio-temporales**, donde distintos agentes y factores han tenido diferente protagonismo en función de la escala temporal y espacial analizada. Por ello, se ha dividido este apartado en 3 tres bloques complementarios:

- ⇒ En primer lugar, se analizan las diferentes causas de las **oscilaciones de la línea de costa a escala geológica**, para proporcionar un contexto global.
- ⇒ En segundo lugar, se contemplan las **causas y factores de la erosión costera en Andalucía a la escala espacio-temporal a la que se circunscribe esta Tesis**: las playas de la costa de Andalucía en el período 1956-2011.
- ⇒ En tercer lugar, se concretan las **escalas temporales en los cambios episódicos y a corto, medio y largo plazo** utilizadas en la Tesis.

2.2.1.- CONTEXTO GEOLÓGICO: CAUSAS Y FACTORES DE LAS OSCILACIONES DE LA LÍNEA DE COSTA

Las líneas de costa, como indicadores genéricos de la línea de contacto de las aguas marinas con las tierras continentales, han sufrido drásticas oscilaciones verticales y horizontales (costas del Mioceno, Mesiniense, etc.), ligadas esencialmente a la evolución geológica del planeta.

Las causas de estas modificaciones y oscilaciones a **escala geológica** están ligadas básicamente a los cambios en:

- ⇒ **El “recipiente”, es decir, las cuencas oceánicas**, que han evolucionado en sincronía con la dinámica de las placas tectónicas, los movimientos verticales de la corteza terrestre –tectónica, isostasia, etc.–, así como su efecto sobre el geoide (controlado básicamente por la gravedad), repercutiendo en la posición del nivel medio del mar (ver Figura 2.4).

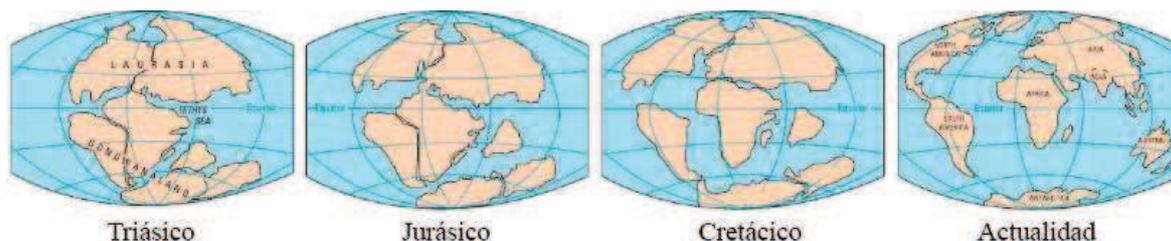


Figura 2.4. Deriva continental según la teoría de Wegener, 1920.
Fuente: extraído de www.taringa.net

⇒ **El volumen de las aguas marinas (eustasia)**. Aunque la cantidad de agua en el planeta, independientemente de las diferentes interpretaciones sobre su origen (Alexander et al., 2012), se puede considerar como estable desde cientos de millones de años, no lo es así la posición del **nivel medio del mar** debido a las repercusiones de los movimientos de la corteza terrestre (comentado en el punto anterior) y a su repercusión sobre el geoide. Adicionalmente, la transferencia de agua desde el océano a las masas continentales puede modificar también el nivel medio del mar y, por lo tanto, conllevar importantes oscilaciones y modificaciones de la línea de costa. La causa de estas transferencias son cambios drásticos en el **clima** y su principal manifestación es la alternancia de ciclos fríos y cálidos ligados a la **cíclica oscilación de períodos glaciares e interglaciares** que han ocurrido en diversas épocas a lo largo de la historia geológica del planeta, intensificados durante el Cuaternario.

A **escala del Cuaternario**, se puede afirmar que la principal causa de las oscilaciones de la línea de costa han sido las alternancias entre ciclos de clima frío (**episodios glaciares**), que conllevan el descenso del nivel del mar por acumulación de hielo en las tierras continentales, y ciclos cálidos (**episodios interglaciares**) que suponen el retorno del nivel del mar a su posición inicial por la fusión masiva del agua en estado sólido. Durante el Cuaternario se han producido más de 50 ciclos de este tipo (estadios isotópicos en su denominación científica actual), siendo el más intenso el último registrado, asociado a la **última glaciación (estadio isotópico 2)** hace escasamente 20.000 años, donde el nivel de las aguas marinas descendió más de 100 m. respecto a la posición actual. La remontada del nivel del mar desde esa posición (<100 m.) alcanzó la posición actual (+ 3-5 m.) hace, aproximadamente **6.000-7.000 años (estadio isotópico 1)**, conocida como “Transgresión Holocena o Flandriense”, ya comentada anteriormente.

A escala del **Holoceno** se produce la ya comentada remontada del nivel del mar desde la posición de la última glaciación (<100 m.) hasta la posición actual (+ 3-5 m.), tras la cual sólo ha habido oscilaciones de orden métrico y sub-métrico. Como consecuencia, se puede afirmar que la mayor parte de la configuración actual de las costas es muy reciente y que, por lo tanto, las playas (nuestro objeto de estudio) y las formaciones sedimentarias a las que se asocian (islas barreras, flechas litorales, barras estuarios, etc.) **se encuentran todavía en un proceso inconcluso de ajuste a la nueva posición del nivel medio del mar.**

Para el **período posterior a la Transgresión Flandriense**, dada la progresiva estabilización del nivel medio del mar (IPCC, 2014), que aún sigue siendo un factor de control de base que afecta al resto de agentes y procesos litorales (temporales, oleaje, mareas...), se puede afirmar que cobran importancia relativa 3 nuevos factores que controlarían el **balance sedimentario** en las costas:

- ⇒ **Neotectónica:** puede modificar el **nivel relativo del mar** (áreas subsidentes y/o tendentes a la elevación), como puede comprobarse por los registros sedimentarios holocenos en muchos sectores de las costas del mundo y las andaluzas en particular (Dabrio et al., 1996, 2000; Harvey et al., 1999; Marín, 2005; Zazo et al., 2008).
- ⇒ **Variaciones en la dinámica marina:** contempladas como cambios en la dirección e intensidad de las corrientes de deriva, están ligadas a cambios en las direcciones del oleaje y corrientes marinas, como puede comprobarse en las formaciones holocenas del sector meridional del Campo de Dalías (Zazo et al., 1996).
- ⇒ **Cambios en el balance sedimentario en las zonas costeras:** tanto en los aportes suministrados por la red hidrográfica (principal fuente para las costas andaluzas), que drenan las cuencas vertientes y transportan sedimentos hacia cada sector costero o de los aportes procedentes de la zona antelitoral sumergida (Lario et al., 1995), como de las salidas de sedimentos del sistema litoral (por el viento hacia los sistemas dunares o por los temporales hacia las zonas profundas marinas).

2.2.2.- CAUSAS Y FACTORES DE LA EROSIÓN DE LAS PLAYAS DE ANDALUCÍA EN EL PERÍODO DE ANÁLISIS (1956-2011)

Se puede afirmar que la erosión en un sector costero con playas expuestas y a la escala espacio-temporal de esta Tesis responde a un **balance sedimentario negativo**, es decir, a que los procesos litorales tengan una mayor capacidad de remover los sedimentos presentes en ellas que de aportar nuevos, resultando en una **pérdida de volumen**, pudiendo ser uno de sus efectos más conocidos el **retroceso de la línea de costa**. El resultado de estos procesos es siempre tridimensional (volumen), lo cual introduce nuevas dificultades técnicas para su análisis y cuantificación. Las causas de este balance sedimentario negativo pueden deberse a factores y procesos que actúan a diversas escalas espacio-temporales. Este hecho es crítico y ha sido ampliamente analizado tanto en documentos técnicos, como los desarrollados por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria⁹, como en numerosas publicaciones científicas (Pardo y Sanjaume, 2001; Bird y Lewis, 2015). Un hecho peculiar de este período es la intervención del Hombre sobre estos procesos, por lo que a los factores y causas que han comandado geológica e históricamente las oscilaciones de las líneas de costa hay que incorporar, a veces con carácter protagonista a estas escalas espacio-temporales, **las alteraciones antrópicas**.

Para el ámbito de estudio, se podría afirmar que cobran importancia los siguientes factores:

- ⇒ **Nivel Medio del Mar NMM** (*Mean Sea level –MSL-*) y **Nivel Relativo del Mar NRM** (*Relative Sea Level –RSL-*).
- ⇒ **Cambios en el clima marítimo: oleaje** (altura, dirección y temporales) y **marea** (rango mareal).
- ⇒ **Cambios en el balance sedimentario y alteraciones antrópicas**.

2.2.2.1.- NIVEL MEDIO DEL MAR Y NIVEL RELATIVO DEL MAR

Es conveniente enfatizar que, aunque los cambios del Nivel Medio del Mar -NMM – (*Mean Sea Level MSL-*) han estado ligados a las oscilaciones glacial/interglacial y al cambio climático actual, globalmente ligado a causas antrópicas con unos altos niveles de certidumbre (IPCC, 2014), **las tasas locales del nivel relativo del mar** (sumatorio de las componentes globales y los cambios verticales de la zona continental) es la variable a

⁹ http://smc.ihcantabria.es/SMC25/descargas-smc2_5-espana/

tener en cuenta en los estudios de erosión costera y resto de riesgos (inundación permanente *-inundation-* o episódica *-flooding-*, etc.), especialmente a las escalas espacio-temporales de esta Tesis Doctoral.

⇒ **Nivel Medio del Mar (*Mean Sea Level –MSL-*)**: tomando los datos del último informe del IPCC (2014), el nivel medio del mar se ha elevado con tasas anuales de **1,5 mm.** (1,3-1,7 mm.) durante el período 1901-1990, aumentando a **2,0 mm.** (1,7-2,3 mm.) para el período 1971-2010 (Tabla 2.1). Estas tasas fueron elaboradas a partir de estudios basados en datos registrados para una selección de mareógrafos a escala mundial (*Permanent Service for Mean Sea Level –PSMSL-*), cuyos datos han sido filtrados de la componente de movimiento vertical de las masas continentales donde se asientan los mareógrafos, utilizando modelos geodinámicos globales (*Peltier*, por ejemplo) para corregir el ajuste isostático ligado a la fusión de los hielos del último período glacial (*Glacial Isostatic Adjustment –GIA-*). El resto de movimientos locales verticales (tectónica, subsidencias, etc.) no han sido corregidos de los datos, excepto por la vía indirecta de seleccionar aquellos mareógrafos ubicados en zonas de mayor estabilidad. Desde 1992 existe la posibilidad de medir diferentes componentes (topografía dinámica y geoide) del nivel medio del mar a partir de altímetros embarcados en satélites (*Topex/Poseidon*, *Janson*, etc.) y de sensores gravimétricos (*GRACE*). Los trabajos publicados proporcionan tasas anuales de **3,2 mm. ±0,4** para el período 1993-2010 (IPCC, 2014). Estos datos, al ser obtenidos con carácter cuasi-global, reflejan la variabilidad espacial del nivel del mar, si bien debido a la escala temporal de los registros, esta variabilidad espacial está mayormente asociada a variaciones de la temperatura y salinidad (efecto estérico), así como a fenómenos hidrodinámicos a esta escala (Niño, NAO, etc.), ligados a los desplazamientos de masa realizados por las corrientes marinas.

Source	1901–1990	1971–2010	1993–2010
Observed contributions to global mean sea level (GMSL) rise			
Thermal expansion	–	0.8 [0.5 to 1.1]	1.1 [0.8 to 1.4]
Glaciers except in Greenland and Antarctica ^a	0.54 [0.47 to 0.61]	0.62 [0.25 to 0.99]	0.76 [0.39 to 1.13]
Glaciers in Greenland ^a	0.15 [0.10 to 0.19]	0.06 [0.03 to 0.09]	0.10 [0.07 to 0.13] ^b
Greenland ice sheet	–	–	0.33 [0.25 to 0.41]
Antarctic ice sheet	–	–	0.27 [0.16 to 0.38]
Land water storage	–0.11 [–0.16 to –0.06]	0.12 [0.03 to 0.22]	0.38 [0.26 to 0.49]
Total of contributions	–	–	2.8 [2.3 to 3.4]
Observed GMSL rise	1.5 [1.3 to 1.7]	2.0 [1.7 to 2.3]	3.2 [2.8 to 3.6]
Modelled contributions to GMSL rise			
Thermal expansion	0.37 [0.06 to 0.67]	0.96 [0.51 to 1.41]	1.49 [0.97 to 2.02]
Glaciers except in Greenland and Antarctica	0.63 [0.37 to 0.89]	0.62 [0.41 to 0.84]	0.78 [0.43 to 1.13]
Glaciers in Greenland	0.07 [–0.02 to 0.16]	0.10 [0.05 to 0.15]	0.14 [0.06 to 0.23]
Total including land water storage	1.0 [0.5 to 1.4]	1.8 [1.3 to 2.3]	2.8 [2.1 to 3.5]
Residual^c	0.5 [0.1 to 1.0]	0.2 [–0.4 to 0.8]	0.4 [–0.4 to 1.2]

Notes:

^a Data for all glaciers extend to 2009, not 2010.

^b This contribution is not included in the total because glaciers in Greenland are included in the observational assessment of the Greenland ice sheet.

^c Observed GMSL rise – modelled thermal expansion – modelled glaciers – observed land water storage.

Tabla 2.1. Cálculos, con datos observados, de la subida del nivel del mar desde 1900
Fuente: IPCC (2014).

Las **estimaciones realizadas para final del próximo siglo (2100)** indican que las tasas de incremento del nivel medio del mar continuarán y, dependiendo del escenario al que se evolucione (Tabla 2.2 y Figura 2.5), podrían tener valores que duplicarían las tasas registradas durante el siglo XX. Estos datos (IPCC, 2014), procedentes de modelos numéricos y escenarios, proporcionan ascensos entre **28 cm.** (escenarios más controladores de la emisión de gases de efecto invernadero) y **98 cm.** (escenarios con menos intervención en la emisión de gases de efecto invernadero) para final del siglo XXI. Es importante constatar que, independientemente del escenario elegido, el nivel del mar seguirá subiendo con tasas entre 2 y 3 mm./año durante la primera mitad del siglo XXI.

Table 13.5 | Median values and *likely* ranges for projections of global mean sea level (GMSL) rise and its contributions in metres in 2081–2100 relative to 1986–2005 for the four RCP scenarios and SRES A1B, GMSL rise in 2046–2065 and 2100, and rates of GMSL rise in mm yr^{-1} in 2081–2100. See Section 13.5.1 concerning how the *likely* range is defined. Because some of the uncertainties in modelling the contributions are treated as uncorrelated, the sum of the lower bound of contributions does not equal the lower bound of the sum, and similarly for the upper bound (see Supplementary Material). Because of imprecision from rounding, the sum of the medians of contributions may not exactly equal the median of the sum. The net contribution (surface mass balance (SMB) + dynamics) for each ice sheet, and the contribution from rapid dynamical change in both ice sheets together, are shown as additional lines below the sum; they are not contributions in addition to those given above the sum. The contributions from ice-sheet rapid dynamical change and anthropogenic land water storage are treated as having uniform probability distributions, uncorrelated with the magnitude of global climate change (except for the interaction between Antarctic ice sheet SMB and outflow), and as independent of scenario (except that a higher rate of change is used for Greenland ice sheet outflow under RCP8.5). This treatment does not imply that the contributions concerned will not depend on the scenario followed, only that the current state of knowledge does not permit a quantitative assessment of the dependence. Regional sea level change is expected in general to differ from the global mean (see Section 13.6).

	SRES A1B	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Thermal expansion	0.21 [0.16 to 0.26]	0.14 [0.10 to 0.18]	0.19 [0.14 to 0.23]	0.19 [0.15 to 0.24]	0.27 [0.21 to 0.33]
Glaciers ^a	0.14 [0.08 to 0.21]	0.10 [0.04 to 0.16]	0.12 [0.06 to 0.19]	0.12 [0.06 to 0.19]	0.16 [0.09 to 0.23]
Greenland ice-sheet SMB ^b	0.05 [0.02 to 0.12]	0.03 [0.01 to 0.07]	0.04 [0.01 to 0.09]	0.04 [0.01 to 0.09]	0.07 [0.03 to 0.16]
Antarctic ice-sheet SMB ^b	-0.03 [-0.06 to -0.01]	-0.02 [-0.04 to -0.00]	-0.02 [-0.05 to -0.01]	-0.02 [-0.05 to -0.01]	-0.04 [-0.07 to -0.01]
Greenland ice-sheet rapid dynamics	0.04 [0.01 to 0.06]	0.05 [0.02 to 0.07]			
Antarctic ice-sheet rapid dynamics	0.07 [-0.01 to 0.16]				
Land water storage	0.04 [-0.01 to 0.09]				
Global mean sea level rise in 2081–2100	0.52 [0.37 to 0.69]	0.40 [0.26 to 0.55]	0.47 [0.32 to 0.63]	0.48 [0.33 to 0.63]	0.63 [0.45 to 0.82]
Greenland ice sheet	0.09 [0.05 to 0.15]	0.06 [0.04 to 0.10]	0.08 [0.04 to 0.13]	0.08 [0.04 to 0.13]	0.12 [0.07 to 0.21]
Antarctic ice sheet	0.04 [-0.05 to 0.13]	0.05 [-0.03 to 0.14]	0.05 [-0.04 to 0.13]	0.05 [-0.04 to 0.13]	0.04 [-0.06 to 0.12]
Ice-sheet rapid dynamics	0.10 [0.03 to 0.19]	0.12 [0.03 to 0.20]			
Rate of global mean sea level rise	8.1 [5.1 to 11.4]	4.4 [2.0 to 6.8]	6.1 [3.5 to 8.8]	7.4 [4.7 to 10.3]	11.2 [7.5 to 15.7]
Global mean sea level rise in 2046–2065	0.27 [0.19 to 0.34]	0.24 [0.17 to 0.32]	0.26 [0.19 to 0.33]	0.25 [0.18 to 0.32]	0.30 [0.22 to 0.38]
Global mean sea level rise in 2100	0.60 [0.42 to 0.80]	0.44 [0.28 to 0.61]	0.53 [0.36 to 0.71]	0.55 [0.38 to 0.73]	0.74 [0.52 to 0.98]

Only the collapse of the marine-based sectors of the Antarctic ice sheet, if initiated, could cause GMSL to rise substantially above the *likely* range during the 21st century. This potential additional contribution cannot be precisely quantified but there is *medium confidence* that it would not exceed several tenths of a meter of sea level rise.

Notes:

- ^a Excluding glaciers on Antarctica but including glaciers peripheral to the Greenland ice sheet.
- ^b Including the height–SMB feedback.
- ^c Including the interaction between SMB change and outflow.

Tabla 2.2. Estimación de subida de nivel medio del mar hasta 2100 según la aplicación de diversos escenarios. Fuente: IPCC (2014).

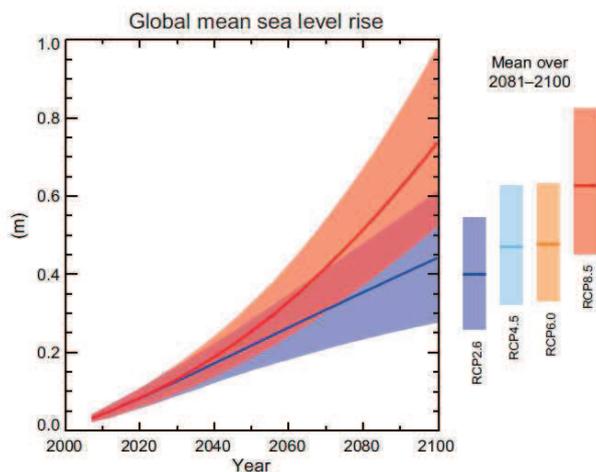


Figure SPM.9 | Projections of global mean sea level rise over the 21st century relative to 1986–2005 from the combination of the CMIP5 ensemble with process-based models, for RCP2.6 and RCP8.5. The assessed *likely* range is shown as a shaded band. The assessed *likely* ranges for the mean over the period 2081–2100 for all RCP scenarios are given as coloured vertical bars, with the corresponding median value given as a horizontal line. For further technical details see the Technical Summary Supplementary Material (Table 13.5, Figures 13.10 and 13.11; Figures TS.21 and TS.22)

Figura 2.5. Estimaciones de subida del nivel medio del mar hasta 2100 según la aplicación de diversos escenarios. Fuente: IPCC (2014).

En relación al cuadro y figura anteriores, es necesario enfatizar que las horquillas de valores asociadas a cada escenario han sido calculadas con modelos numéricos basados en procesos y escenarios (*process-based*). Adicionalmente, recientes publicaciones utilizando métodos estadísticos semiempíricos (Rahmstorf, 2007; Jevrejeva et al., 2010, 2012) pronostican tasas de subida para final de siglo XXI aún mayores.

⇒ **Nivel Relativo del Mar (*Relative Sea Level –RSL*)**: el nivel relativo del mar, registrado por los **mareógrafos** y utilizado comúnmente para la descripción e interpretación de sus tasas de variación, debe ser filtrado de la componente de movimientos verticales del sector costero donde está anclado el mareógrafo para obtener los cambios del nivel medio del mar que, al incorporar exclusivamente la “componente eustática”, es el indicador directamente relacionado con el cambio climático. Sin embargo, para los estudios de vulnerabilidad, riesgos o impactos es coherente utilizar el nivel relativo del mar (sin filtrar) ya que es éste el que refleja directamente el grado de exposición de un sector costero ante una nueva situación del nivel marino (independientemente de la causa), siendo utilizado para la evaluación de riesgos y, más concretamente en este caso, la erosión costera.

Este parámetro tiene el inconveniente de ser puntual (ubicación del mareógrafo) y difícilmente extrapolable, dado el comportamiento irregular de los factores tectónicos (bloques subsidentes o tendentes a la elevación) y sedimentarios (subsidiencias en zonas de acumulación) o antrópicos (extracción de agua o petróleo) que pueden favorecer movimientos verticales en las tierras emergidas costeras.

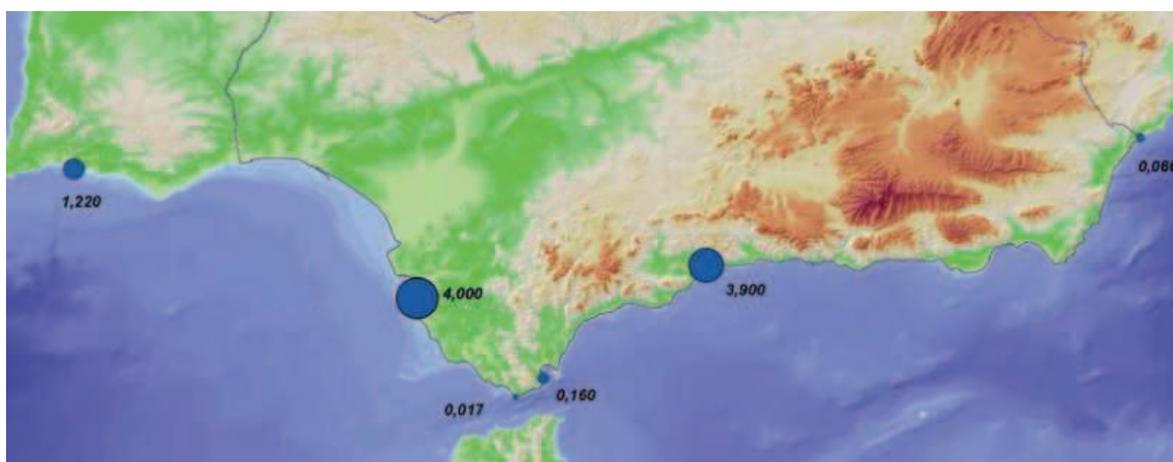


Figura 2.6. Tasa de elevación anual (mm./año)
Fuente: CMAOT, 2011.

Los datos para los mareógrafos en la costa andaluza y periféricos demuestran este hecho (ver Tabla 2.3) al mostrar tasas superiores a las registradas para el nivel medio del mar (tendencia global), incluidas las proporcionadas por los altímetros en satélites. Los mareógrafos de Cádiz y Málaga registran tasas superiores y sensiblemente más bajas Algeciras por citar los datos de los que tienen series más largas. El resto, con registros temporales sensiblemente menores (Fraile y Fernández, 2016) presentan valores más variables, pero predominan tasas incluso superiores.

Mareógrafo	Período	Años	Nivel medio	Tasa (mm. / año)	Tendencia global
Huelva	1996-2011	13	398,80	5,63	3,18
Bonanza	1992-2011	17	290,50	5,69	3,18
Cádiz	1960-2011	47	170,00	3,95	1,94
Algeciras	1944-2011	43	108,00	0,40	1,82
Málaga I	1962-2011	45	-6,20	2,34	1,96
Málaga II	1992-2011	17	-6,20	4,78	2,85
Motril	2005-2012	6	30,00	-0,94	
Almería I	1978-1997	13	398,80	5,63	3,18
Almería II	2006-2011	6		2,96	
Alicante	1960-1995	34		-0,80	

Tabla 2.3. Datos sobre nivel del mar procedentes de los mareógrafos andaluces y periféricos. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Fraile y Fernández, 2016.

2.2.2.2.- CAMBIOS EN EL CLIMA MARÍTIMO: OLEAJE Y MAREA

⇒ **Oleaje:** el principal factor que controla los *inputs* de energía en las playas expuestas de Andalucía es, como en casi todas las playas expuestas, el oleaje. Por ello, el análisis de esta variable en el período temporal de esta Tesis resulta crítico si se pretende una interpretación causal de las tasas de erosión. Este hecho se escapa a los objetivos de esta Tesis (ver epígrafe 1.2.2), ya que supondría el tratamiento estadístico de series temporales y su correspondiente modelización numérica para la propagación de los valores medidos (boyas) o modelados (WANA) a cada punto de cálculo de las tasas de erosión (cada 50m. de playa).

En la Figura 2.7 se puede observar las diferencias regionales del parámetro más directamente relacionado con la capacidad energética de la ola: **la altura media de la ola significativa (Hs)** extraída del trabajo de la Universidad de Cantabria para el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA, 2004). De él, se deriva la mayor exposición energética de la fachada atlántica (exceptuando sectores semiprotectidos: Bahía de Cádiz y Algeciras) y una clara distinción en la fachada mediterránea entre las costas almeriense y el resto. La principal variable que justifica esta diferencia regional es el *fetch*.



Figura 2.7. Puntos de análisis para la costa andaluza del régimen medio de altura de ola significativa media
Fuente: CMAOT, 2011.

Otro aspecto de interés es la dirección del oleaje, ya que su interacción con la línea de costa genera derivas litorales que pueden movilizar sedimentos dentro de una misma unidad fisiográfica y favorecer procesos de erosión o acumulación en la misma unidad fisiográfica.

Por último, un factor importante para los procesos erosivos es la incidencia de eventos extremos (temporales) ya que pueden implicar cambios drásticos de la línea de costa de lento proceso de recuperación. Por ello, a los efectos de esta Tesis, es muy importante conocer exactamente la fecha de los fotogramas que integran las ortofotografías para evaluar la posible incidencia de un evento extremo próximo a la fecha de la captura de las fotografías.

⇒ **Marea:** una característica esencial en nuestro ámbito de estudio es la presencia de rangos mareales variables. En este sentido, los rangos mareales

de las costas **atlánticas** son claramente **mesomareales** (rangos de mareas vivas medias **>2m.**), con máximos en Huelva y Bahía de Cádiz (<3m.) para descender paulatinamente hacia el Estrecho de Gibraltar. Por el contrario, **las costas mediterráneas** son **micromareales (<2m.)**, con valores predominantes entre 0,5-1 m. donde, a veces, puede ser superados por la marea meteorológica (*surges*). Este aspecto, asociado a la pendiente de la zona antelitoral (inferior en la vertiente atlántica que en la mediterránea), hace que la incidencia del oleaje se disipe en una estrecha banda en las playas mediterráneas, mientras el rango mesomareal del atlántico permite disipar la energía en una amplia banda. Como consecuencia de esto, las costas atlánticas son menos vulnerables a los episodios extremos (temporales) que las costas mediterráneas aun cuando la altura de la ola en temporal sea menor.

2.2.2.3.- CAMBIOS EN EL BALANCE SEDIMENTARIO Y ALTERACIONES ANTRÓPICAS

Este es el factor de mayor importancia en la mayor parte de los períodos temporales analizados en esta Tesis. Básicamente, este balance se establece en cada sector a partir de la relación entre las entradas de sedimentos al sistema litoral (*inputs*) y las salidas del mismo (*outputs*).

⇒ **Entradas (*inputs*)**: las principales entradas de sedimentos al sistema provienen de:

- Aportaciones de sedimentos detríticos por las cuencas vertientes y ríos: la principal entrada de sedimentos en la costa andaluza.
- Los aportes de la zona antelitoral sumergida: sedimentos arenosos en praderas de fanerógamas, por ejemplo.
- Las entradas laterales de sedimentos por el transporte longitudinal (deriva litoral).
- Las entradas de sedimentos por la erosión de sectores regresivos (acantilados).
- Las entradas de sedimentos por los vientos con dirección desde las tierras emergidas a las playas.

⇒ **Salidas (*outputs*)**: las principales salidas de sedimentos al sistema litoral provienen de:

- Salidas de sedimentos hacia la zona submarina y plataforma (temporales, por ejemplo).

- Salidas de sedimentos por acreción de formaciones litorales (flechas, tómbolos, etc.).
- Salidas de sedimentos transportados por la deriva hacia aguas profundas en algunos puntos (proximidades de acantilados).
- Salidas de sedimentos por deflación eólica hacia el interior (sistemas dunares).
- Salidas de sedimentos transportados por las corrientes de flujo mareal hacia el interior de estuarios y marismas.

La intensa presión antrópica sobre el sistema litoral en las últimas décadas ha incidido profundamente en el balance sedimentario de las costas y de las playas, especialmente las andaluzas. Las **principales alteraciones antrópicas** son:

⇒ **Alteraciones a las entradas (*inputs*)** de sedimentos:

- Reducción de inputs por el manejo de cuencas vertientes y la regulación hidrológica de los cauces y ríos (embalses).
- Reducción de inputs por la destrucción de sectores productivos de sedimentos detríticos en la zona antelitoral (pesca, anclaje de embarcaciones, etc.).
- Alteración de los aportes eólicos por el efecto de pantalla de edificios.
- Alteración positiva por los procesos de alimentación artificial de playas y regeneración dunas.

⇒ **Alteraciones a las salidas (*outputs*)** de sedimentos:

- Extracciones de áridos en cauces (urbanización).
- Extracciones de áridos en playas y dunas (muy frecuentes en las zonas de enarenados e invernaderos).
- Diseño de algunos espigones que dirigen el flujo sedimentario de la deriva hacia aguas profundas.

⇒ **Alteraciones al tránsito sedimentario longitudinal (*deriva*)**: cualquier infraestructura construida sobre la playa (emergida y sumergida) altera la deriva dominante, favoreciendo procesos de acumulación en la margen a favor de la misma y de erosión en la margen contraria.

- Barreras totales: puertos, grandes diques y espigones.
- Barreras parciales: campos de espigones, diques pequeños, etc.

⇒ **Alteraciones al tránsito sedimentario transversal:**

- Cualquier construcción antrópica sobre la playa o en contacto con ella (paseos marítimos, urbanizaciones, escolleras, etc.) tiene importantes efectos, ya que, por una parte impide los ajustes de los perfiles transversales y, por otra, intensifica el efecto del oleaje en temporales (reflexión), provocando procesos erosivos intensos y el desplazamiento de sedimentos hacia aguas profundas.
- Cualquier construcción antrópica (urbanizaciones, viales...) sobre la duna costera (*foredune*) tiene un efecto parecido, ya que impide que la duna ceda sedimentos en eventos de alta energía (temporales) para contribuir al alargamiento del perfil transversal y facilitar la disipación energética del oleaje. El efecto es parecido al anterior, provocando procesos erosivos intensos y el desplazamiento de sedimentos hacia aguas profundas.

Para finalizar este epígrafe, se puede concluir **enfatizando la dificultad de establecer las causas de los procesos erosivos en esta Tesis** ya que, aunque el ámbito de estudio es regional (toda la costa de Andalucía), las tasas se calcularán a escala local (una medición cada 50 m.). A esta escala, los factores y causas comentadas exigirían de estudios muy pormenorizados que incorporasen los cambios en nivel relativo del mar (difícil de interpolar a partir de mareógrafos), en la variabilidad del clima marítimo (exigencia de modelización numérica), en la cuantificación de los elementos del balance sedimentario (cuantificación de los aportes en cuencas vertientes, etc.) y en los efectos de las alteraciones antrópicas al mismo (regulación cuencas, alteraciones a la deriva, regeneraciones de playas, etc.). Esta es la razón por la que se ha optado, **dado el enfoque esencialmente metodológico de esta Tesis**, por:

- ⇒ un **análisis descriptivo y estadístico** de los cálculos de las tasas para la totalidad de la costa de Andalucía, y
- ⇒ la **incorporación de los datos existentes** de estos factores y agentes (mareógrafos, oleaje...) y de las **alteraciones antrópicas** cartografiadas (diques, espigones, paseos marítimos, escolleras, etc.), intentando relacionarlos con las tasas en los **2 Tramos estudiados en detalle**, pero sin entrar en establecer relaciones de causalidad. La posibilidad de incorporarlos todos en el visor web permitirá su acceso e interpretación más pormenorizada por aquellos especialistas conocedores de cada sector a escala local.

2.2.3.- ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LA EROSIÓN DE LAS PLAYAS DE ANDALUCIA EN EL PERÍODO DE ANÁLISIS (1956-2011)

Como se ha podido observar en los epígrafes precedentes, los procesos de erosión en las playas y las causas en las oscilaciones de la línea de costa actúan a diferentes escalas espacio-temporales (Crowell et al., 1993; Anfuso, 2001), las cuales, además, son definidas con diversos criterios según los diferentes especialistas (geólogos, geomorfólogos, cuaternaristas, ingenieros de costas, etc.), escalas de análisis (global, regional, local) e interés temático (cambio climático, riesgos...). Por ello, se ha considerado oportuno darle un significado específico y concreto a los conceptos de **cambios episódicos** y a **corto, medio y largo plazo** que utilizaremos en esta Tesis:

Siguiendo a Sánchez-Arcilla y Jiménez (1994), se dejarán al margen a los **cambios episódicos**, ligados a eventos extremos de alta energía y período de retorno largo, los cuales no tienen una escala temporal definida ya que, por la naturaleza de los agentes que los inducen (generalmente asociados a temporales y mareas meteorológicas), deben considerarse como aleatorios. Una vez excluidos éstos, los cambios en la línea de costa se pueden clasificar en:

- ⇒ **Cambios a corto plazo:** Los principales agentes de estos cambios (oleaje y viento) generan cambios estacionales y/o cíclicos (episodios de oleaje de alta energía/baja energía), afectando a todo el perfil activo de las playas (perfil de tormenta/perfil de bonanza) y conllevando retrocesos y avances de la línea de costa. La escala temporal es, por lo tanto, inferior a 1 año.
- ⇒ **Cambios a medio plazo:** aluden a los cambios que experimenta la costa (las playas esencialmente) de forma sistemática y pueden considerarse como la tendencia evolutiva a una escala espacial kilométrica y temporal de varios años. El oleaje y, especialmente, su capacidad para transportar sedimentos a lo largo de la costa (deriva), así como las variaciones en su intensidad (sectores acumulativos y erosivos), es el principal agente impulsor de estos cambios. Por ello, se suele considerar el oleaje dominante integrando sus valores a lo largo del año. El balance sedimentario (aportes de ríos o sectores erosivos y acumulativos) funcionaría en estos casos como una condición de contorno.
- ⇒ **Cambios a largo plazo:** aluden a los cambios que experimenta la costa de forma global (tanto en planta como en perfil), siendo el resultado final del

balance sedimentario. La escala temporal de estos cambios es de varias décadas. Los principales factores y agentes que controlan estos cambios son:

- Variaciones en los aportes: de los ríos principalmente, en las costas andaluzas o procedentes de la zona antelitoral.
- Variaciones en el nivel relativo del mar: que incorpora la componente global (eustasia) y local (elevaciones o subsidencias de las tierras emergidas), generadas tanto por causas naturales como antrópicas. Las elevaciones relativas implican pérdidas de sedimentos hacia la zona submarina y los descensos relativos suelen implicar acumulación de sedimentos.
- Variaciones en las salidas de sedimentos: bien por pérdidas hacia la zona submarina (oleaje o corrientes) como hacia las tierras emergidas (progradación de formaciones sedimentarias –flechas, deltas, etc.-, incremento de deflación y generación de dunas, etc.).

Dado que el período temporal de esta Tesis (**1956-2011**) y subperíodos de análisis no bajan de intervalos inferiores a la década, se podría definir la escala de este análisis como un estudio de la **evolución de la línea de costa a medio-largo plazo**. Dentro de estas escalas se ha denominado como período de referencia al cálculo de tasas para el intervalo temporal **1977-2011** (incluyendo casi 34 años), comparándose tanto con un **período histórico** pasado (**1956-1977**) como con un **período reciente** más pequeño (**2001-2011**) y con un período equivalente al histórico (en torno a 2 décadas) correspondiente al intervalo **1977-2001**.

2.3.- ANTECEDENTES, FUENTES Y METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

2.3.1.- CONSIDERACIONES SOBRE LA MEDICIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN LAS PLAYAS EXPUESTAS

Los estudios de erosión de playas se han incrementado en las últimas décadas debido a que cada vez más estructuras y actividades antrópicas están amenazadas por los procesos de erosión costera que se ven acentuados por la potencial subida del nivel del mar (Bird, 1996).

El abanico metodológico para medir la erosión de playas es tan extenso como características y objetivos se persiguen con cada estudio (Komar, 1976; Short, 2001). La actual **disponibilidad de fuentes de datos fiables** desde el punto de vista de la precisión y de la resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica hacen posible la obtención de resultados consistentes. No obstante, la **viabilidad** de los resultados está estrechamente ligada al **período de estudio** y al tipo de **metodología** utilizada.

El uso de una u otra metodología para el cálculo de la tasas de erosión, obedece generalmente a la **escala espacio-temporal** utilizada para su medición. Desde el punto de vista espacial, la medición de las tasas de erosión puede medirse de tres formas distintas: cálculo del cambio volumétrico, superficial o de distancia lineal:

- ⇒ **Cálculo de volumen:** esta metodología aborda el fenómeno erosivo desde una perspectiva tridimensional, expresada en **m.³/m. lineal de playa** (Del Río, 2007). No obstante, según las características y escalas utilizadas, pueden considerarse medidas alternativas, como por ejemplo **m.³/mes/ m. lineal** (Gracia et al., 2005). Su cálculo exige altimetría de precisión para todo el perfil de playa activa. Los escasos ejemplos existentes se corresponden con trabajos parciales que utilizan topografía y *GPS* o información procedente de vuelos LiDAR, que miden la pérdida de sedimentos en la totalidad del perfil de la playa.
- ⇒ **Cálculo de superficie:** esta metodología analiza la erosión desde una perspectiva bidimensional en **m²/m. lineal de playa**. Se basa en la cuantificación del retroceso de una “línea de costa” entre 2 fechas determinadas, de cuya intersección se generan polígonos cuyas áreas representan la superficie erosionada o acumulada. Este método exige la identificación del elemento que se considere representativo de la línea de costa (*proxy*) para las fechas de referencia, su registro posicional bien con *GPS* en

campo o a través de la interpretación y/o la digitalización del mismo en documentos de referencia (mapas, MDT, ortofotografías u ortoimágenes de satélite), y el posterior cálculo de la superficie erosionada.

- ⇒ **Cálculo de distancia lineal:** Esta metodología sólo exige información puntual entre dos fechas para calcular la pérdida de sedimentos en distancia de retroceso de la línea de costa. Se suele hacer utilizando líneas y medidas de distancia (**m.**). Exige, por tanto, la delimitación de un punto o línea a partir del cual medir el retroceso (en caso de que lo haya). Éste constituye el método más utilizado, si bien su cálculo sólo es posible en tierra emergida.

Del mismo modo, también es posible realizar pronósticos del comportamiento de la evolución de las playas en el futuro. Éstos se basan en datos pasados y su proyección hacia el futuro, siendo necesario de unos datos de entrada sólidos y de un modelo matemático fiable (Gonçalves et al., 2012). Tradicionalmente, la predicción de la evolución costera se ha fundamentado, principalmente, en modelos matemáticos de regresión lineal, cálculos aplicados de modelización numérica y Ley de Bruun¹⁰, que pronostican, con un intervalo de confianza dado, la posición de una línea de costa futura, suponiendo una dinámica evolutiva regular, libre de fluctuaciones (Douglas y Crowell, 2000). Estas fluctuaciones, de origen natural (temporales), inducido (aceleración en la subida del nivel medio del mar) y antrópico (infraestructuras), alteran la variabilidad natural, restando exactitud a las estimaciones conforme aumenta el intervalo temporal de las mismas (Srivastava et al., 2005; Maiti y Bhattacharya, 2009), haciendo necesario la inclusión de parámetros de ajuste.

Además de la escala espacio-temporal, la disponibilidad de fuentes de datos será un factor clave para la medición de la erosión costera, no sólo porque el error y la integridad de los cálculos dependerá de la fuente utilizada, sino porque, además, **la**

¹⁰ Regla de Bruun: regla basada en el perfil de equilibrio de una playa que relaciona el ascenso eustático con la regresión de la línea de costa afectada, de tal forma que el retroceso longitudinal de la línea de costa equivale entre 50 y 100 veces al ascenso vertical de la columna de agua (Bruun, 1954, 1962). Así, un metro de ascenso del nivel del mar equivaldría a un retroceso de la línea de costa de 50 a 100 metros. La exclusión en el modelo de la dinámica litoral, las características morfológicas sedimentarias del *nearshore* y eventos extraordinarios, así como la presencia de infraestructuras antrópicas hacen cuestionable el cumplimiento de la misma, puesto de manifiesto por varios autores (Mimura y Nobuoka, 1995; Cooper y Pilkey, 2004; Ranasinghe et al., 2012).

disponibilidad de una fuente u otra determinará el período de estudio, el objeto de análisis (la parte de la playa implicada en el estudio), la metodología y el análisis a realizar.

A continuación se realizará un análisis de las fuentes que pueden ser utilizadas para medir la erosión en las playas, prestando especial atención a sus principales ventajas e inconvenientes, así como a la recopilación de los diversos antecedentes que ya han utilizado dicha fuente para medir la erosión.

2.3.2.- DISPONIBILIDAD DE FUENTES DE INFORMACIÓN. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS DE MEDICIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN EN LAS PLAYAS EXPUESTAS

Numerosos científicos y planificadores han utilizado datos históricos para medir la erosión y acreción de las playas y determinar su alcance y magnitud. Antes de comenzar con el análisis de las fuentes de información y tipos de medición, resulta necesario volver a enfatizar que **el cálculo más efectivo y real de la pérdida de sedimentos en una playa es aquél que permite un análisis tridimensional (m^3)**, si bien la revisión de antecedentes realizada revela que los cálculos superficial y lineal son los más utilizados históricamente, ante la ausencia de datos tridimensionales. Esta matización resulta crítica ya que, según Ojeda (2015), un retroceso de 2 m. en una duna costera de 3 m. de altura supone la erosión de $6 m^3$, mientras que el mismo retroceso en una duna de 1 m. de altitud sólo supone una erosión de $2 m^3$. Por todo ello, es necesario recordar la **precaución** con la que han de ser interpretados los datos obtenidos en análisis de superficies y, sobre todo, de distancias lineales.

En la Tabla 2.4 se observa cómo la disponibilidad de las fuentes determina tanto el objeto de estudio y su amplitud (playa emergida, sumergida o completa) como el período de análisis (largo, medio o corto plazo), además del método de cálculo (volumen, superficie o distancia) y la precisión de éste.

En este aspecto, el uso de metodologías alternativas a la cartografía, ya sea histórica o actual (o en combinación con la misma), para la deducción de paleolíneas de costa se hace indispensable para la viabilidad de estudios a muy largo plazo. El carácter indirecto (utilización de *proxies*) de las fuentes de datos utilizadas requiere mucha cautela en su interpretación. Restos arqueológicos, tales como puertos e instalaciones costeras

(Barragán y Castro, 2009), torres de vigilancia marítima (Pardo, 1991), infraestructuras de defensa (Domínguez, 2003) o, incluso, restos de naufragios históricos (Bethencourt et al., 2011) suelen ser utilizados como indicadores de situación de líneas de costa pretéritas. La ubicación de paleolíneas de costa a través de las descripciones de geógrafos clásicos suele ser muy imprecisa, no obstante, su uso junto con métodos más fiables dotan de cierta utilidad a estas fuentes complementarias (Alonso et al., 2009). La deducción de éstas mediante estudios geológicos suele ser un método con cierto nivel de fiabilidad (Arteaga et al., 1989), cuya horquilla temporal es notablemente superior a las de los métodos anteriores.

La metodología más utilizada ha sido la comparación de dos líneas de costa digitalizadas a partir de imágenes satélites y ortofotografías. Si bien estas fuentes resultan ideales para medir la erosión en ámbitos amplios y para el medio-largo plazo, no obstante, estas fuentes sólo resultaban válidas para medir la erosión en la zona emergida de la playa. El análisis de cambios volumétricos, el ideal, sólo resulta posible a partir de la realización de levantamientos topográficos o el uso de *Global Positioning System (GPS)* que solo podrían realizarse en la playa emergida y, parcialmente en la sumergida, pero sin completar ésta ya que las profundidades de cierre (límites de la playa submarina) en las costas andaluzas pueden llegar hasta los 11 m. de profundidad (MAPAMA, 2013a).

La aparición de sensores aerotransportados *Light Detection and Ranging (LiDAR)*, especialmente los de tipo batimétrico que incluyen dos sensores trabajando en diferentes longitudes de onda, son los únicos que permiten cuantificar la erosión como un fenómeno tridimensional y medir sus cambios tanto en la playa sumergida como emergida, si bien, por su reciente aparición poseen poca capacidad retrospectiva y, por su alto precio, sólo se han llevado a cabo estudios en zonas muy localizadas.

A continuación se realizará un detallado análisis de las características de las fuentes de información para el cálculo de la erosión de playas, prestando especial atención al uso que se ha hecho de ellas, antecedentes y los principales problemas asociados.

FUENTE DE DATOS	DISTANCIA (LINEAL Y PUNTUAL)	SUPERFICIE	VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN
	PLAYA EMERGIDA	PLAYA EMERGIDA	PLAYA EMERGIDA	PLAYA SUMERGIDA (PARCIAL)	PLAYA COMPLETA
Cartografía histórica					
Levantamiento topográfico / GPS					
Vuelo fotogramétrico					
Ortofotografía					
Imagen de satélite				INDIRECTA	INDIRECTA
LiDAR					

INCONVENIENTES	TRAMA
Precisión limitada	
Limitación espacial (no apta para zonas amplias)	
Perspectiva cónica	
Limitación temporal (no retrospectiva)	
Alto precio. Limitación temporal (no retrospectiva)	

Tabla 2.4. Fuentes de datos para el análisis de la erosión en playas y sus principales inconvenientes.

Fuente: elaboración propia.

2.3.2.1.- CARTOGRAFÍA HISTÓRICA

Comúnmente se acepta la definición de cartografía histórica como aquella anterior a la incorporación de la red geodésica al proceso de levantamiento topográfico, no obstante, en este trabajo es considerada como tal todo aquel documento cartográfico anterior a la implantación del vuelo fotogramétrico para la realización de mapas topográficos. La utilidad de estas fuentes de datos radica en la posibilidad de ubicación, más o menos aproximada, de líneas de costa históricas gracias al **carácter continuo** espacial y a la **amplitud temporal** que éstas posibilitan.

En la mayoría de los casos, estos documentos tienen como principal inconveniente su **escasa precisión**, provocada por la escala y por el método del levantamiento cartográfico (punto a punto), que resta exactitud a las líneas incorporadas a los mapas (Ojeda, 2000).

El uso de cartografía histórica permite exclusivamente el cálculo de **distancias lineales** entre líneas de costa o bien como **cambios superficiales**, pero únicamente de la **playa emergida**. Esto se debe a un criterio de delimitación de las líneas de costa puramente altimétrico (***tidal datum-based proxy***) que, en la mayoría de los casos, no son coincidentes entre distintas fuentes. En este aspecto, las principales fuentes de datos históricos son los mapas topográficos y las cartas náuticas. Mientras que los mapas topográficos utilizan el “cero topográfico”, las cartas náuticas se rigen por el “cero hidrográfico”, caracterizado por la posición de bajamar extrema de la marea y, por tanto, variando sensiblemente cuando los tramos analizados son amplios. La imprecisión generada por el escaso margen del ámbito de estudio (playa emergida) y por las escalas (pocos detalladas) de estos documentos impiden la cuantificación de variaciones costeras en detalle (ver Figura 2.8), proporcionando sólo tendencias generales en áreas litorales con cambios notables (Del Río, 2007).

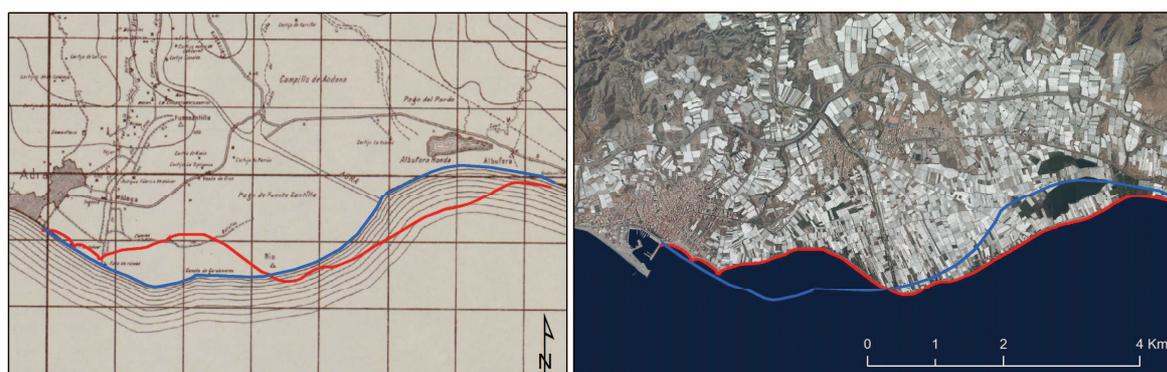


Figura 2.8. Comparación entre cartografía histórica (mapa topográfico del Estado Mayor del Ejército Alemán 1940-1944) y actual (ortofotografía digital en color de Andalucía 2010-2011) del delta del río Adra (Almería).
Fuente: elaboración propia.

El uso de esta fuente para la medición de la oscilación la línea de costa es muy extendido a nivel mundial, sobre todo en Norteamérica (Taney, 1961; Anders y Byrnes, 1991; Crowell et al., 1991; Thieler y Danforth, 1994), donde el criterio de delimitación de la línea de costa en mapas topográficos coincide con la marca húmeda de la marea alta media (*Mean High Water –MHW-*).

En España, el uso de cartografía histórica es escaso, predominando estudios puntuales y de ámbitos litorales diversos (Rivas y Cendrero, 1992). En Andalucía, si bien son muy escasos, los estudios litorales existentes se han realizado para áreas muy puntuales (Ménanteau et al., 1983). Existen trabajos puramente metodológicos centrados

en la evaluación del nivel de exactitud de la cartografía histórica a escala regional, sin especificar su aplicación en el ámbito litoral (Moreno y Cortés, 2011).

2.3.2.2.- LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO/GPS

La inclusión de los levantamientos topográficos convencionales y mediante *Global Positioning System (GPS)* en el mismo apartado obedece a una lógica eminentemente metodológica, basada en mediciones puntuales y secuenciales desde la perspectiva temporal.

La medición **punto a punto** propia de los levantamientos topográficos mediante sistemas convencionales y con *GPS* hace de los mismos la **metodología más precisa** y fiable para el estudio de la erosión costera, no obstante, su ya mencionado carácter puntual hace de la misma una **fuentes de datos discontinua** desde el punto de vista espacial y **secuencial** desde el punto de vista temporal, quedando restringida a **zonas muy localizadas** por la primera característica y presentando más problemas para ámbitos de estudio amplios y fenómenos muy dinámicos por la falta de sincronismo, como es el caso del objetivo pretendido por el presente trabajo de investigación. De igual modo, la imposibilidad de acceder a datos pasados de una misma zona **impide estudios retrospectivos a medio-largo plazo**, siendo de utilidad para cambios muy recientes (de algunos años atrás en el mejor de los casos).

El uso de este tipo de fuentes permite cálculos de **distancias lineales**, de **superficies** y de **volúmenes** a partir de mediciones puntuales de alta precisión, tanto de la **playa emergida** como en **una parte reducida de la playa sumergida**. El cálculo de coordenadas x,y,z permite delimitar la línea de costa según criterios altimétricos (***datum-based proxy***) como con elementos reconocibles en terreno (***feature-based proxy***). Según Ojeda (2000), este ha sido el procedimiento clásico para realizar estudios sobre cambios de la línea de costa a escala de detalle, siendo una metodología muy habitual para la realización de perfiles transversales en las playas y analizar su comportamiento morfodinámico.

Merece especial mención, como uso complementario a los anteriores, (por permitir la medición de las zonas sumergidas), la utilización de ecosondas monohaz o multihaz combinadas con *GPS*. Su uso permite la incorporación de datos batimétricos (playa sumergida) a los levantamientos topográficos obtenidos para la parte emergida (ver Figura 2.9). Es necesario destacar la ineficiencia para zonas de escasa batimetría, donde

las características de la propia embarcación impiden su uso para profundidades inferiores a los 2-4 m., zona de importancia crítica para la correcta caracterización de la playa sumergida por ser muy activa en el tránsito sedimentario.

Su rápida implantación ha desembocado en su uso a nivel mundial, como así lo reflejan estudios en Norteamérica (Mitasova, 2004; Lantuit y Pollard, 2008), en Extremo Oriente (Lee et al., 2013) y Oceanía (Harley et al., 2011).

A nivel nacional, son diversos los trabajos tanto en la vertiente atlántica, orientados a la comparación de perfiles topográficos (Medina et al., 1994; Arias et al., 1999; Sanjosé et al., 2015), como en la mediterránea (Pardo et al., 2005), orientados al mismo fin (Mir, 2009). En territorio insular, existen análisis topográficos para la playa emergida (Fontán et al., 2008; Bru y Alonso, 2013) y para la playa sumergida (Fontán et al., 2012) mediante ecosondas.

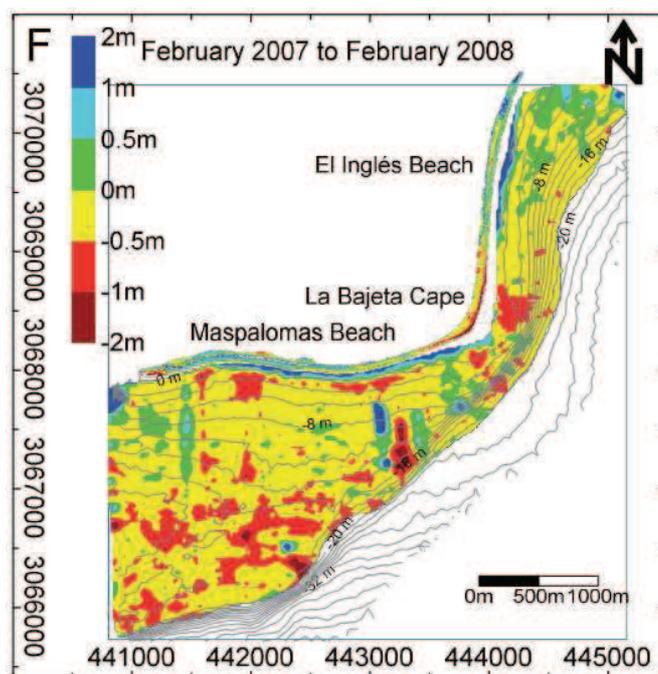


Figura 2.9. Balance sedimentario anual (2007-2008) en el conjunto de la zona emergida y sumergida en las playas de Maspalomas y El Inglés.
Fuente: extraído de Fontán et al., 2012.

A nivel regional, la costa andaluza ha sido objeto de multitud de trabajos, en su amplia mayoría centrados en el análisis de perfiles topográficos en la vertiente atlántica mediante el uso de técnicas topográficas convencionales (Reyes et al., 1996; Ballesta et al., 1998; Anfuso et al., 1999; Del Río et al., 2002; Anfuso y Del Río, 2003; Gracia et al., 2005; Valenzuela et al., 2013) y *GPS* (Ávila et al., 2009; Rangel y Anfuso, 2011; Durán et

al., 2014). Merece especial mención los análisis sedimentológicos realizados en los grandes estuarios atlánticos mediante el uso de sonar (Rodríguez et al., 2011; Morales et al., 2014, 2015). Por su parte, los estudios de la vertiente mediterránea, pese a ser más escasos, se centran en el análisis del perfil topográfico de playas (Manzano et al., 2004) y en la morfología de los prodeltas más destacados (Jabaloy et al., 2008; Bárcenas et al., 2009, 2016).

2.3.2.3.- IMAGEN DE SATÉLITE

El desarrollo de la Teledetección en los años 60 supuso un hito en la monitorización de la superficie terrestre. La capacidad de los sensores de percibir radiaciones electromagnéticas en un rango superior al espectro visible¹¹ (**multiespectralidad**), así como la posibilidad de captar imágenes de cualquier zona del planeta de forma repetitiva multiplica exponencialmente las utilidades prácticas de las imágenes de satélite (Labrador et al., 2012). Las características de la plataforma estacionaria (altura y tipo de órbita) así como las inherentes al propio sensor dotan de una enorme variedad de resoluciones (espacial, temporal, espectral y radiométrica) al mismo, cobrando cada una de ellas distinto protagonismo en función del objetivo perseguido (ver Figura 2.10). Inicialmente, la altura y frecuencia de paso de órbita de la plataforma espacial ofrecían altas resoluciones temporales, no obstante, impedían estudios a gran escala dada su **baja resolución espacial**, necesaria para estudios costeros a detalle.

A partir de la década de 1990, la puesta en órbita y funcionamiento de **sensores de alta resolución espacial** para uso civil (otrota para uso exclusivamente militar), y **actualmente de muy alta resolución** (*Very High Resolution –VHR-*), permite la captación de imágenes a niveles de detalle nunca antes alcanzados en sensores a bordo de plataformas satelitales, facilitando el seguimiento continuo de variables climáticas, ambientales y sociodemográficas (Singh et al., 2013; Yang et al., 2013).

En este sentido, los niveles de resolución actuales permiten un análisis detallado de la evolución costera mediante dos métodos bien conocidos. El primero de ellos, mediante

¹¹ Espectro visible: Rango de la radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano (0.4-0.7 μm), coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar (Chuvieco, 2002).

fotointerpretación visual, permite la identificación de elementos concretos (*proxies*) en la imagen evitando los errores geométricos propios las fotografías tomadas a baja altura. En este sentido, en la presente Tesis Doctoral se han utilizado este tipo de fuentes para la digitalización de sectores acantilados (ver apartado 3.1.2), cuyos errores de abatimiento en fotografías aéreas y ortofotografías (tratadas a continuación) restaban fiabilidad a los resultados. El segundo método, cada vez más utilizado, se basa en la **reclasificación automática** de imágenes mediante software especializado (Puissant et al., 2008; Pardo et al., 2012).

Independientemente del método utilizado, las imágenes satelitales a gran resolución ofrecen **continuidad espacial**, siendo aptas para áreas de estudio de dimensiones considerables, no obstante, **impiden un análisis retrospectivo** a largo plazo al no disponer de una horquilla temporal lo suficientemente amplia, siendo inabordable para el presente trabajo de investigación.

Desde su aparición, permiten análisis a través de la medición de **distancias** entre líneas y **superficiales**, especialmente para la **playa emergida**. Estudios recientes han permitido, mediante análisis utilizando la profundidad de penetración de la energía electromagnética (*penetration depth*), la inferencia de la batimetría y el cálculo de cambios batimétricos (volumen) en zonas de aguas claras son sensores ópticos, como por ejemplo, arrecifes de coral (Green et al., 2000; Liceaga y Euan, 2002; Vanderstraete et al., 2003; Purkis y Riegl, 2005; Purkis et al., 2006; Lesser y Mobley, 2007). Actualmente se han realizado estudios similares en zonas estuarinas (de análisis más complejo) para la playa sumergida, estableciendo correlaciones entre de la turbidez del agua y datos batimétricos de apoyo suministrados por LiDAR batimétricos (Sánchez et al., 2014).

A nivel mundial son muchos los trabajos realizados mediante teledetección (Frihy et al., 1994; Kerr y Ostrovsky, 2003; Turner et al., 2003; Mars y Houseknecht, 2007; Jensen y Cowen, 2011), destacando actualmente estudios en zonas de países emergentes en Extremo Oriente (Maiti y Bhattacharya, 2009; Chand y Acharya, 2010; Siripong, 2010; Mukhopadhyay et al., 2012; Nandi et al., 2016), Oriente Próximo (Kuleli, 2010) y en el continente africano (Appeaning et al., 2012).

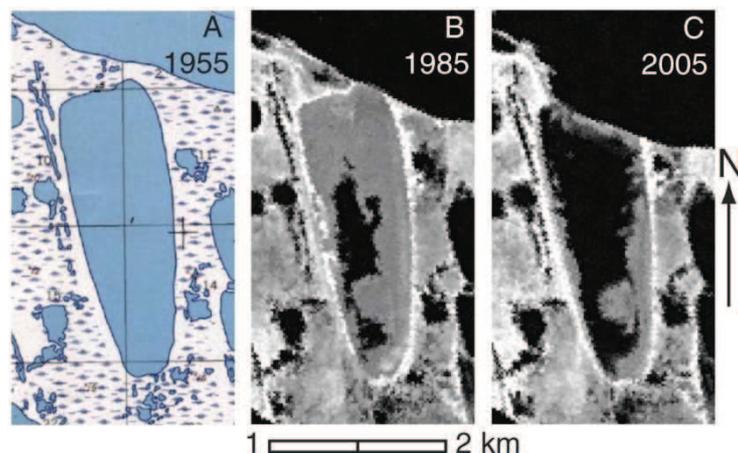


Figura 2.10. Estudio de erosión en la costa septentrional de Alaska durante el período (1955-2005) mediante el uso de teledetección.

Fuente: extraído de Mars y Houseknecht, 2007.

En España, el uso de la Teledetección aplicada al ámbito litoral ha sido ampliamente abordada en la costa mediterránea (Pardo et al., 2012, 2014; Almonacid et al., 2016), más concretamente el estudio de zonas deltaicas (Rodríguez, 2001; Rodríguez et al., 2013; Ramírez et al., 2016).

En Andalucía, el uso de la Teledetección en el ámbito litoral también ha sido frecuente, tocando varios aspectos de la dinámica litoral (Ojeda, 1988a; Ojeda et al., 1993) y medioambientales, centrados en los cambios de usos de suelo (Vallejo et al., 2000) y calidad de las aguas (Gutiérrez et al., 1999; Sánchez, 2015).

2.3.2.4.- LIGHT DETECTION AND RANGING (LIDAR)

En los últimos años, el desarrollo nuevos sensores ha supuesto un salto cualitativo en la toma de datos desde plataformas aéreas. En este sentido, la cada vez mayor implantación de los sistemas de altimetría láser aerotransportada *LiDAR* para el levantamiento tridimensional supone, progresivamente, la disponibilidad de datos altimétricos con continuidad espacial a resolución centimétrica que permitirán la realización estudios de cambios volumétricos de detalle cuando existan series históricas (ver Figura 2.11).

Sus enormes ventajas a nivel de prestaciones contrastan con su **elevado precio**, haciéndolo asequible para zonas de estudio relativamente pequeñas, cuya aparición reciente le otorga un **escaso nivel de alcance como fuente de datos a medio-largo plazo** (Ojeda, 2000). El vasto potencial de usos se extiende, mediante el uso conjunto de

tecnología LiDAR terrestre y batimétrico, tanto al análisis de la **playa emergida** como **sumergida** y permite, por tanto, el cálculo **volumétrico**, **superficial** y las **distancias** entre líneas de costa. En este sentido admite, no sólo la identificación de líneas de costa en función a elementos conocidos reconocibles (*feature-based proxy*), sino también desde el punto de vista altimétrico (*tidal datum-based proxy*) como los que propone la nueva Ley de Costas para la identificación de “sectores en riesgo erosión severos” (Ojeda, 2015).

A nivel internacional, sólo algunos países con fuerte inversión en desarrollo territorial (Estados Unidos, Canadá, España...) disponen de datos LiDAR para la totalidad de su ámbito geográfico. Sus múltiples utilidades en ámbito costero se derivan en estudios enfocados en la extracción de líneas de costa (Limber et al., 2005; White, 2007; Lee et al., 2009; Zhou y Xie, 2009) y MDT de alta resolución (Harris et al., 2006; Mitsova et al., 2009), gestión del espacio litoral (Brock y Purkis, 2009; Jones et al., 2010; Paine et al., 2016), gestión de riesgos naturales costeros (Burvingt et al., 2016) y estudios batimétricos (Wang y Philpot, 2007; Pastol, 2011; Kim et al., 2017), entre otros.

A nivel nacional existen proyectos muy ambiciosos, como el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), entre cuyos objetivos destaca la obtención de datos *LiDAR* de todo el territorio nacional, lo que permitirá su uso en el futuro. Dado su carácter novedoso, son escasos los estudios con aplicaciones *LiDAR* a nivel nacional, siempre apoyados mediante el uso de fuentes adicionales. Los actuales estudios se centran en la obtención de MDT de alta precisión para los sistemas playa-duna (Cabrera et al., 2013; Sánchez et al., 2014; Mir et al., 2015; Pérez, 2015).

En Andalucía, se han realizado estudios a partir de vuelos específicos, como el efectuado en el ámbito de la desembocadura del río Guadiana (Ojeda, 2015). De igual forma, se han abordado ámbitos litorales diversos, tales como sistemas dunares y flechas litorales, tanto desde el punto de vista de geomorfológico (Ojeda y Vallejo, 2008) como de riesgos naturales (Fraile et al., 2013, 2014).



Figura 2.11. Imagen realizada con datos del sensor LiDAR batimétrico “HawkEye II” para el delta submarino y sistema litoral asociado a la desembocadura del Guadiana.
Datos proporcionados por la empresa StereoCarto.
Fuente: Ojeda (2015)

2.3.2.5.- VUELO FOTOGRAMÉTRICO

Pese al orden cronológico seguido con las anteriores fuentes de datos, se ha hecho una excepción con los vuelos fotogramétricos, al ser la fuente de información original de la cual deriva la mayoría de documentos cartográficos y análisis territoriales realizados en la actualidad. Los vuelos fotogramétricos sentaron las bases de las fuentes de información territorial actuales, suponiendo un recurso de enorme utilidad a la hora de **cartografiar la realidad** y poder hacer mediciones fiables a partir de sus productos (especificados en el Capítulo 3).

La aparición de los primeros vuelos fotogramétricos durante los años 40 del pasado siglo XX le aportan **carácter retrospectivo** a los datos. De estos primeros vuelos se obtenían fotogramas analógicos en formato físico (papel), siendo necesarios los procesos de orientación mediante métodos de restitución fotogramétrica para permitir **mediciones lineales, superficiales y altimétricas** de precisión o para generar los principales productos cartográficos: los mapas topográficos. Sin embargo el proceso de restitución en playas no proporcionaba suficiente precisión debido a las características de los vuelos en zonas de escasa pendiente y altimetría. Su alto precio impedía, en la mayoría de ocasiones, el acceso a la restitución de los fotogramas a científicos temáticos, por lo que la georreferenciación mediante técnicas convencionales daba lugar a problemas considerables de precisión.

Con la revolución informática llegó el **procesamiento digital** (tras **escaneado** de fotogramas analógicos) de las imágenes aéreas y su posterior **georreferenciación** mediante puntos de control y rectificaciones con ecuaciones polinomiales. Este paso digital, aunque condicionante del tamaño de píxel de la imagen resultante (Catalão et al., 2002), incrementaba exponencialmente la eficiencia durante el proceso de georreferenciación, generalizándose el uso de las mismas. Las escalas de vuelo, cada vez mayores, unidas a las mejoras en el equipamiento fotográfico, permitían obtener datos de precisión para el ámbito litoral, convirtiéndose en la fuente de información más utilizada para el cálculo de tasas de erosión durante las décadas de los 80 y 90 (ver Figura 2.12), aunque exclusivamente de la **playa emergida** y para análisis temporales a **medio-largo plazo**. En este caso, los **problemas geométricos**, inherentes a la propia perspectiva cónica de la cámara, se veían incrementados por las discontinuidades generadas en las zonas de solapamiento entre fotogramas, como consecuencia del proceso de georreferenciación individual de los mismos. De igual modo, el uso y tratamiento de fotogramas individuales hace muy costoso y difícil el análisis de amplias zonas, siendo inabordable para las dimensiones del ámbito de estudio de la presente Tesis Doctoral.

A nivel internacional, destacan los trabajos de Dolan et al. (1978, 1980, 1991), Overton y Fisher (1997), Morton et al. (2004) o Morton (2016). A nivel nacional se han realizado estudios tanto en la vertiente atlántica (Lorenzo et al., 2003) como mediterránea (Brocal et al., 2001; Crous y Pintó, 2006) e insular (Alonso et al., 2007).

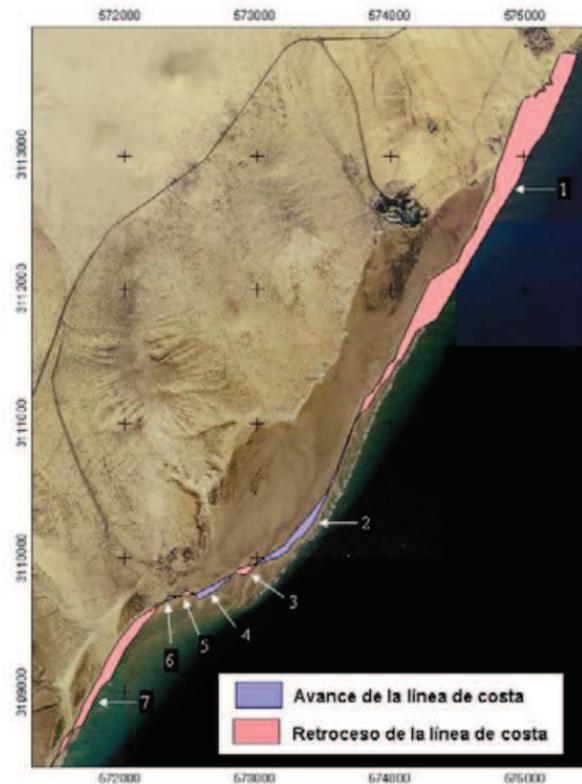


Figura 2.12. Variación neta de la superficie de la playa de Sotavento en Fuerteventura mediante el uso de fotografías aéreas.
Fuente: extraído de Alonso et al. (2007).

La generalización de los vuelos digitales supuso un salto de calidad tanto en las características de la toma de datos como en el tratamiento postproceso de los mismos. La obtención de datos en formato digital no sólo simplificó los problemas derivados de la georreferenciación individual de los fotogramas, sino que también hizo descender el precio de la producción de **ortofotografías digitales**, cuya importancia para el presente trabajo de investigación ha supuesto su descripción detallada en un apartado individual, descrito a continuación.

ORTOFOTOGRAFÍA DIGITAL

El uso de las ortofotografías digitales ha simplificado el cálculo de las tasas de erosión al proporcionar mayor coherencia geométrica, mejorando las rectificaciones geométricas (puntos de control y polinomios de diferente grado) que se utilizaban con las fotografías aéreas tradicionales.

La ortofotografía es un producto cartográfico resultante del tratamiento digital de fotografías aéreas, mediante el cual se **corrigen todas las deformaciones**

correspondientes a la perspectiva cónica de los fotogramas antes mencionada, y se le otorga un rigor geométrico equivalente a un mapa. Así, el uso de fotogramas ortorrectificados reduce considerablemente los posibles errores impuestos por el desplazamiento de las imágenes estereoscópicas (Moore y Griggs, 2002; Ojeda et al., 2002). Su utilidad, además, adquiere una dimensión práctica en análisis basados en amplias zonas de estudio, donde los procesos de georreferenciación y mosaicado previos de las imágenes ortorrectificadas (continuidad espacial y radiométrica) facilitan enormemente la labor del investigador. No obstante, la ortorrectificación **elimina las características estereoscópicas** (visión tridimensional) y, con ello, la posibilidad de medir volumétricamente. Por ello, las ortofotografías sólo son útiles para el análisis de **distancias lineales y cálculos superficiales**. De igual manera, durante el proceso de mosaicado, es alterada la **radiometría** de las mismas, modificando el valor de los píxeles y, con ello, las condiciones de fotointerpretación.

La disponibilidad de ortofotografías mediante **servicios web interoperables orientados a la visualización (WMS)** ha facilitado su acceso, siendo necesaria la conexión a Internet para la utilización de los mismos. En este caso, la resolución espacial y radiométrica de las imágenes depende del formato de salida, siendo los más frecuentes *jpeg* y *png*.

Desde la generalización en la producción y difusión de las ortofotografías son muchos los ejemplos y antecedentes de medición cuantitativa de cambios en la línea de costa a través de ellas a nivel internacional (Overton y Fisher, 1997; Fletcher et al., 2003; Lee et al., 2009; Appeaning, 2013; Stanchev et al., 2013). A nivel nacional, existen estudios costeros tanto para la vertiente mediterránea (Belmonte et al., 2013; Ibarra et al., 2015; Ibarra, 2016; Martín et al., 2016) como para la atlántica (Quevedo y Hernández, 2014; Blanco et al., 2015; Sánchez et al., 2015; Flor-Blanco et al., 2015; Sanjosé et al., 2015, 2016).

Por todo ello y a modo de resumen, se puede afirmar que la precisión geométrica, unida a la posibilidad de análisis retrospectivo y al cálculo lineal y superficial del ámbito de la playa emergida hacen de la **ortofotografía digital la fuente de datos idónea para la presente Tesis Doctoral**.

Como antecedentes directos de los objetivos de esta Tesis, se sintetizarán en el siguiente epígrafe las principales experiencias derivadas del uso de los productos derivados de los vuelos fotogramétricos en el ámbito de estudio del presente trabajo.

2.3.3.- EXPERIENCIAS DERIVADAS DEL USO DE LOS PRODUCTOS DEL VUELO FOTOGAMÉTRICO EN ANDALUCÍA

La notable influencia de la costa en la región andaluza (917 Km.) unida a los importantes cambios que con la llegada del turismo de masas y la concentración demográfica está sufriendo el frente litoral, hacen de la costa andaluza un ámbito de creciente interés entre la comunidad científica desde muchos enfoques temáticos. Desde la aparición y generalización de los vuelos fotogramétricos como fuente principal de datos, son muchos los estudios y trabajos de investigación que los han utilizado para el análisis del sistema costero y específicamente para el cálculo de tasas de erosión en las costas de Andalucía. En este apartado se sintetizan las diversas experiencias, dividiéndolas según el uso de **fotogramas individuales** georreferenciados o con el uso de restituidores y, más relacionadas con los objetivos concretos de este trabajo, según el uso de las **ortofotografías** desde su publicación generalizada y difusión pública.

En relación con el uso de los **fotogramas (analógicos o digitales)**, existe un amplio número de estudios de erosión costera en ambas vertientes de la costa de Andalucía. En la **vertiente atlántica** se observan estudios de tasas de erosión con el uso de fotogramas georreferenciados mediante puntos de control, como son los trabajos de Del Río et al. (2002) y Del Río (2007) –ésta última Tesis Doctoral-, los cuales describen a la descripción a diversas escalas espacio-temporales del fenómeno erosivo, principalmente en el sector gaditano (Chipiona – Tarifa). De igual manera, Rodríguez et al. (2008) describe, mediante el uso combinado con cartografía histórica y fotografía aérea, la evolución de la costa onubense en su totalidad (río Guadiana – río Guadalquivir), centrándose en los cambios de la dinámica litoral actual como consecuencia de la intervención antrópica sobre el frente costero.

En sectores más específicos se observan diversos estudios como los de Ojeda et al. (2002) para el tramo occidental de la costa onubense (Isla Cristina – La Antilla), donde se integran el cálculo de tasas con fotogramas georreferenciados y cálculos volumétricos en dunas con GPS. Ojeda y Vallejo (1995) analizan las tasas de erosión en la flecha de

El Rompido con fotogramas georreferenciados junto a un estudio volumétrico de la playa submarina asociada a su extremo distal con información batimétrica procedente de cartas náuticas. Borrego et al. (2000) realiza un estudio con apoyo de cartografía histórica acerca de la evolución de Isla Saltés (Huelva), comparando los patrones de crecimiento históricos (naturales) con los actuales (inducidos). Ballesta et al. (1998) realiza un estudio superficial de los efectos de los temporales de 1995-1996 en la Playa de Mazagón, apoyada puntualmente por perfiles topográficos que ayudan a una aproximación volumétrica del fenómeno erosivo. Domínguez et al. (2004, 2008), mediante un análisis evolutivo de distancias lineales, calcula las tasas para el tramo noroccidental gaditano (Sanlúcar de Barrameda – Rota).

La **vertiente mediterránea**, por su parte, refleja una disminución de estudios evolutivos del litoral, hecho que contrasta con la actual situación de su frente costero, muy alterado por la presencia masiva de elementos antrópicos. En este aspecto, existen estudios a escala provincial, como el de Lechuga et al. (2002), cuya propuesta de ordenación litoral aporta un completo estudio sedimentario y evolutivo de la costa malagueña. De igual modo, la Tesis Doctoral de Viciano (1998) aborda las repercusiones que las actividades antrópicas han generado sobre los depósitos sedimentarios litorales de la costa almeriense, realizando un análisis de tasas de erosión superficiales en base a la utilización de fotografías aéreas y líneas de costa extraídas de la cartografía de detalle generada por la Dirección General de Costas, realizada mediante restitución fotogramétrica.

También constan estudios centrados en sectores litorales más específicos, como el de Senciales y Malvárez (2003), describiendo la evolución del delta del río Vélez mediante el uso conjunto de fotografías aéreas y cartografía histórica. De similar metodología, aunque desde una perspectiva sedimentológica, Maldonado (2009) realiza un detallado estudio sobre la evolución del frente deltaico del río Guadalfeo. Jabaloy et al. (2008) aborda un análisis acerca de la evolución histórica de la desembocadura del río Adra, así como de la morfología de su delta y prodelta. Por su parte, Espinosa y Rodríguez (2009), junto al uso conjunto de imágenes de satélite, ofrece un análisis detallado de la erosión costera a medio y corto plazo del tramo almeriense comprendido entre Vera y San Juan de los Terreros (Pulpí), en relación a los cambios en los usos de suelo del litoral.

La difusión de vuelos fotogramétricos realizados con aviones que incorporan *GPS* y sistemas de navegación inercial (*inertial navigation system -INS-*) facilitan la producción y difusión de **ortofotografías** desde hace 2 décadas. El rigor geométrico unido a la continuidad espacial de la misma han situado la ortofotografía aérea como fuente de datos principal, relegando el uso de fotogramas individuales georreferenciados a un segundo plano. En Andalucía son muchos los estudios litorales que centran su metodología en el uso de ortofotografías en ambas vertientes de la costa de Andalucía.

En la **vertiente atlántica**, al igual que con el uso de los fotogramas individuales georreferenciados, se han realizado numerosos estudios de tasas de erosión basados en ortofotografías, tanto en la provincia de Cádiz como en la de Huelva. Así, Ojeda et al. (2015) presentan una propuesta de corrección direccional de errores en ortofotografías históricas (las de peor calidad geométrica) posteriores al cálculo de tasas de erosión, para el ámbito río Guadiana - Rota. Por su parte, García y Vallejo (2012) abordan la caracterización del sistema playa-duna, realizando un análisis exhaustivo del comportamiento evolutivo lineal del sector dunar del Parque Nacional de Doñana (Huelva). Por otra parte, el estudio de Del Río et al. (2013), junto con el uso de fotografías aéreas, describe los patrones de comportamiento evolutivo lineal a medio y largo plazo de la totalidad del frente gaditano atlántico.

Para espacios más reducidos, existen estudios de sectores específicos del litoral atlántico andaluz, como es el caso de la Tesis Doctoral de Puig (2016), abordando un conjunto de variables explicativas del fenómeno erosivo en ciertos sectores concretos de la Bahía de Cádiz (playas de Vistahermosa, Valdelagrana, La Victoria y Camposoto) a corto y medio plazo.

En la **vertiente mediterránea**, el estudio de la evolución del frente costero mediante el uso de ortofotografías se centra, principalmente, en sectores específicos afectados por graves problemas de erosión: los deltas. En este caso, el trabajo de Prieto et al. (2012) realiza un análisis sobre la evolución lineal de la línea de costa para los principales deltas mediterráneos (deltas de los ríos Vélez, Guadalfeo, Albuñol, Huarea, Adra, Andarax y Almanzora) a largo plazo.

Existen estudios sobre formaciones deltaicas concretas como, por ejemplo, los trabajos de Guisado y Malvárez (2015), centrado en el análisis del rol de las condiciones de oleaje de alta energía sobre la oscilación lineal del frente costero a largo plazo para el

delta del río Vélez (Málaga), y de Rubiño et al. (2012), quien mediante el uso conjunto de ortofotografías y cartografía histórica de apoyo, aborda la oscilación lineal del frente costero y su relación con la población para el delta del río Guadalfeo.

A modo de síntesis final de este epígrafe, se puede afirmar que el uso de los productos derivados de vuelos fotogramétricos para el cálculo de erosión costera y, específicamente de las playas, ha sido muy numeroso en las costas de Andalucía. En ellos se detectan las siguientes características:

- ⇒ El método de cálculo predominante ha sido el la medida de **distancias** entre líneas de costa generadas tanto por fotogramas rectificadas con puntos de control como sobre ortofotografías. En menor medida, se ha utilizado cambios superficiales y cambios volumétricos.
- ⇒ Se han utilizado diferentes **criterios de fotointerpretación (*proxies*)**, siendo predominantes la marca húmeda generada por la última marea y, muy puntualmente el límite interior de la playa (*backshore/foredune*). En muchos de ellos, no se explica claramente el *proxy* utilizado.
- ⇒ En casi todos **sólo se utiliza la geometría** digitalizada de las líneas de costa para el cálculo, **sin incluir otras variables temáticas** (tipo de costa, presencia de infraestructuras, etc.) de interés para el análisis de posterior de la misma.
- ⇒ Se han utilizado **diferentes períodos temporales** de análisis, predominando los de medio-largo plazo.
- ⇒ En muchos de ellos, **no se especifica** claramente **el proceso de digitalización**, fotointérpretes, **ni** si se utiliza una **única escala** para ello.
- ⇒ Existe una gran **diversidad en la extensión de los ámbitos de estudio**, pero difícilmente se supera el ámbito provincial y, en ningún caso, se aborda la totalidad de las playas de Andalucía.

Todas estas características **dificultan la comparación entre trabajos precedentes** (diferentes *proxies*, fotointérpretes, metodología, períodos temporales, escalas...) e, incluso, entre los valores de las tasas calculadas en los mismos, imposibilitando el análisis conjunto para obtener una visión general del comportamiento de las tasas de erosión en las playas de Andalucía. Los precedentes con este objetivo son las aproximaciones elaboradas por el Grupo de Investigación al que pertenece el autor de la Tesis y que han servido de precedente para la definición de los objetivos de la misma. En este aspecto, se pueden señalar los trabajos de Ojeda et al. (2010, 2013),

Díaz et al. (2012, 2013) y Fernández et al. (2015) acerca del diseño del modelo de datos, levantamiento de líneas de costa, cálculo de tasas y generación de indicadores temáticos para la totalidad del frente costero andaluz, si bien utilizaban unos criterios de digitalización menos rigurosos que los que se han establecido en las hipótesis y objetivos de esta Tesis Doctoral y que se recogen en el Capítulo 3 dedicado a la metodología, centrados en el **levantamiento de líneas de costa a escala única (1:2.500), mediante unos criterios de fotointerpretación únicos (2 *proxies*) y realizados por un solo fotointérprete para toda la costa de Andalucía en 5 períodos temporales.**

2.4.- EXPERIENCIAS SOBRE EL USO DE GEOVISORES WEB PARA LA DIFUSIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN

Entre los objetivos planteados en esta Tesis Doctoral se enmarca aquél vinculado al compromiso de difusión de sus resultados en Internet. El desarrollo experimentado en los últimos años en el uso de software de código abierto ha impulsado la propagación de este tipo de aplicaciones que permiten el acceso y la difusión de información geográfica en la web, incrementan la interoperatividad y permiten la combinación de datos y servicios mediante el uso de estándares.

Estas aplicaciones fomentan el trabajo colaborativo que, según Ojeda et al. (2010), proporcionan a la geovisualización un valor adicional, destacando la posibilidad de aportar el marco espacial y temporal a distintas escalas y constituyendo herramientas útiles para la planificación y la participación pública en la formulación de políticas. Ello ha posibilitado y ampliado el uso de las TIG en lo que se ha venido en denominar “*Public Participation GIS –PPGIS-*” (Dunn, 2007; Brooks, Butt, & Fargher, 2017; Bugs, Granell, Fonts, Huerta, & Painho, 2010).

No es de extrañar, por tanto, que la aparición de visores web haya proliferado en los últimos años y que hoy día la práctica totalidad de los organismos de investigación y gestión hagan uso de estas aplicaciones para la difusión de la información. En este caso, destaca para el ámbito de estudio el visor de la Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía (IDEA)¹² o la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), que **utiliza visualizadores temáticos o genéricos¹³ para hacer accesible la cartografía ambiental al público en general.** Este es el caso del visor web de playas de Andalucía¹⁴, del de datos climáticos CLIMASIG¹⁵ o del Visor del Subsistema del Litoral y Medio Marino¹⁶, estos últimos diseñados y desarrollados por el Grupo de Investigación RNM-177, al que pertenece el autor de la presente Tesis.

¹² <http://www.ideandalucia.es/portal/web/ideandalucia/datos-y-servicios/ideavisor>

¹³ <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.f361184aaadba3cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=168a7c119370f210VgnVCM2000000624e50aRCRD>

¹⁴ <http://laboratoriolediam.cica.es/VisorPlayasAndalucia/>

¹⁵ <http://www.climasig.es/>

¹⁶ http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/visorlitoral/litoral.html?r=lang_es

A nivel nacional, son destacables los visores web desarrollados por **MAPAMA**¹⁷, que publica cartografía relacionada con temas como la protección del patrimonio natural, del mar, del agua, la biodiversidad, el desarrollo rural, los recursos agrícolas, ganaderos, pesqueros y alimentarios, entre otros.

Dichos organismos, tanto IDEA como REDIAM o MAPAMA, disponen de gran cantidad de información relacionada con la temática de estudio de esta Tesis Doctoral, publicada como servicios OGC, proporcionando información de base incorporada a los visores desarrollados en este trabajo.

La difusión de resultados a través de visores geográficos web es una labor ampliamente desarrollada por el Grupo de Investigación RNM-177, ya que ha diseñado y utilizado estos para la difusión de los resultados de diferentes proyectos de I+D+i en los que participa. En este aspecto, destacan los visores que recogen los resultados de los proyectos de I+D+i *“Espacialización y difusión web de datos de urbanización, y fitodiversidad, para el análisis de vulnerabilidad ante los procesos de inundación asociados a la subida del nivel del mar en la costa andaluza”*¹⁸, financiado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa y *“Espacialización y difusión web de variables demográficas, turísticas y ambientales para la evaluación de la vulnerabilidad asociada a la erosión de playas en la costa andaluza”*¹⁹ (Referencia CSO2010-15807), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Todo lo anterior ha determinado que la estrategia planteada para la difusión de los resultados obtenidos en este trabajo se base, además de su publicación como **servicios OGC**, en el diseño y desarrollo de un **geovisor web**, que además, constituye el único elemento capaz de ofrecer al lector la posibilidad de **visualizar de forma multiescalar e interactiva los resultados de esta Tesis Doctoral**.

A lo largo de los apartados siguientes se analizarán algunas experiencias del uso de visores web en la difusión de tasas de erosión específicamente y se expondrán las diferentes aplicaciones desarrolladas por el Grupo de Investigación.

¹⁷ <http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/>

¹⁸ <https://www.excelencia.gis-and-coast.org/>

¹⁹ <https://www.nacional-dev.gis-and-coast.org/>

2.4.1. EL USO DE VISORES WEB PARA LA DIFUSIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN

A lo largo de este apartado se recopilarán y analizarán varios visores web generados para la difusión de resultados de investigaciones vinculadas a las tasas de erosión, prestando especial atención a su grado de interacción con el usuario. Según Ojeda et al., 2015, generalmente se reconocen 3 niveles de interacción con el usuario (Figura 2.13): (i) proporcionar información (unidireccional); (ii) consulta (bidireccional con retorno de la opinión del usuario) y (iii) participación activa (multidireccional –no sólo se comenta la información ofrecida, sino que se puede dar opinión de lo comentado por cualquier otro usuario-). En la Tabla 1 se ha intentado sintetizar las características de algunos de los visores web sobre tasas de erosión que más relación tienen con los objetivos de esta Tesis y las funcionalidades implementadas. En cierta medida, ofrecen una visión del “estado del arte” sobre este objetivo (difusión web) y permiten contextualizar los avances y singularidades de los desarrollados en este trabajo (apartado 3.6).

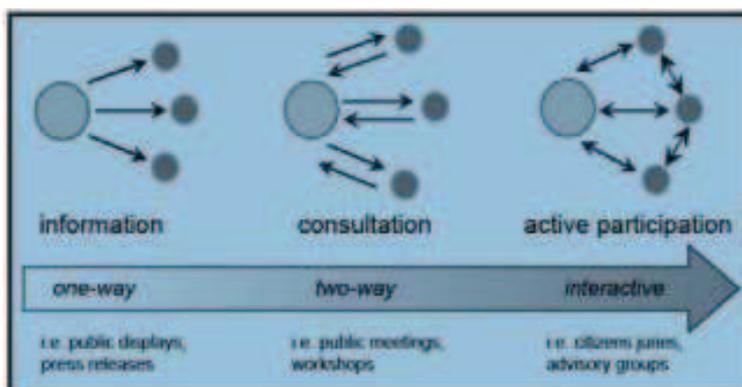


Figura 2.13. Niveles de interacción con el usuario en los procesos participativos.
Fuente: OECD, 2001.

Del análisis de los geovisores recogidos en la Tabla 2.5 se pueden extraer un conjunto de conclusiones:

- ⇒ La mayor parte de los visores solo consiguen el nivel 1 de interacción con el usuario, es decir el acceso visual a la información, no permitiendo al usuario la posibilidad de realizar interactuar con ellos (enviando comentarios, u opiniones) o la participación activa.

- ⇒ Sólo algunos presentan capacidades limitadas para la exploración/explotación interna de los datos originales y funcionalidades limitadas de exportación de la visualización consultada (*KML*, *CSV*, etc.).
- ⇒ La mayor parte de los visores analizados no permite la importación o visualización de otra información (servicios interoperables, *KML*, etc.) que, por ejemplo, podría facilitar al usuario la interpretación de las tasas de erosión/progradación representadas con información complementaria.
- ⇒ Una parte importante se desarrollan con aplicaciones propietarias en el servidor (APIs de Google o ArgGis server).
- ⇒ También es importante señalar en relación con el punto anterior que, en muchos de ellos, los propios servicios web que visualizan no son generados por servidores de mapas “*open source*”, ni siguen estándares que garanticen la interoperabilidad (servicios interoperables *OGC*).

Atendiendo a las características de cada aplicación, se observa como *North Carolina Coastal Erosion*²⁰ y *Coastal Erosion*²¹ (Figuras 2.14 y 2.15) son mapas interactivos con unas funcionalidades de navegación muy básicas mientras que *Maui Shoreline Study Erosion Maps*²², permite el acceso a mapas en formato *pdf* que representan las tasas de erosión de una zona concreta (Figura 2.16).

²⁰ <https://deq.nc.gov/about/divisions/coastal-management/coastal-management-oceanfront-shorelines/oceanfront-construction-setback-erosion-rate>

²¹ http://maps.environment-agency.gov.uk/wiyby/wiybyController?x=357683&y=355134&scale=1&layerGroups=default&ep=map&textonly=off&lang=_e&topic=coastal_erosion

²² <http://www.soest.hawaii.edu/coast/erosion/maui/index.php>

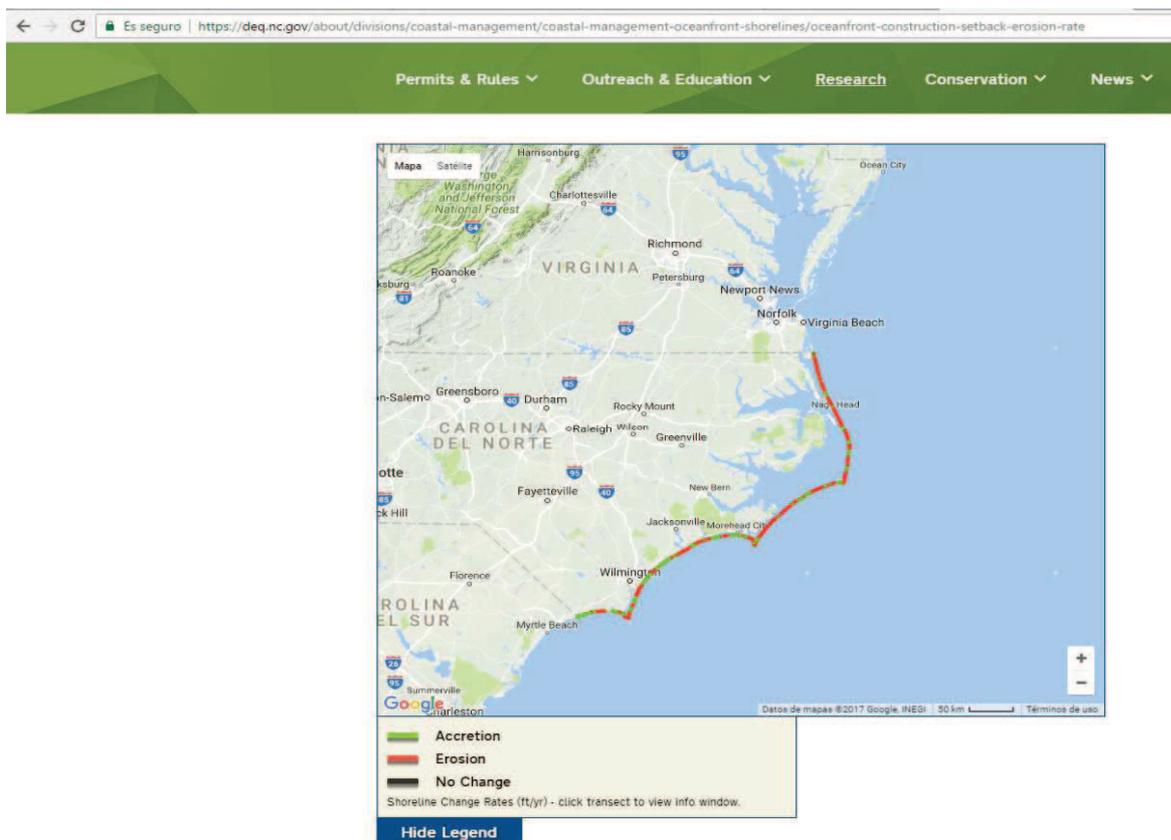


Figura 2.14. Interfaz de la aplicación *North Carolina Coastal Erosion*.
Fuente: <https://deq.nc.gov/>

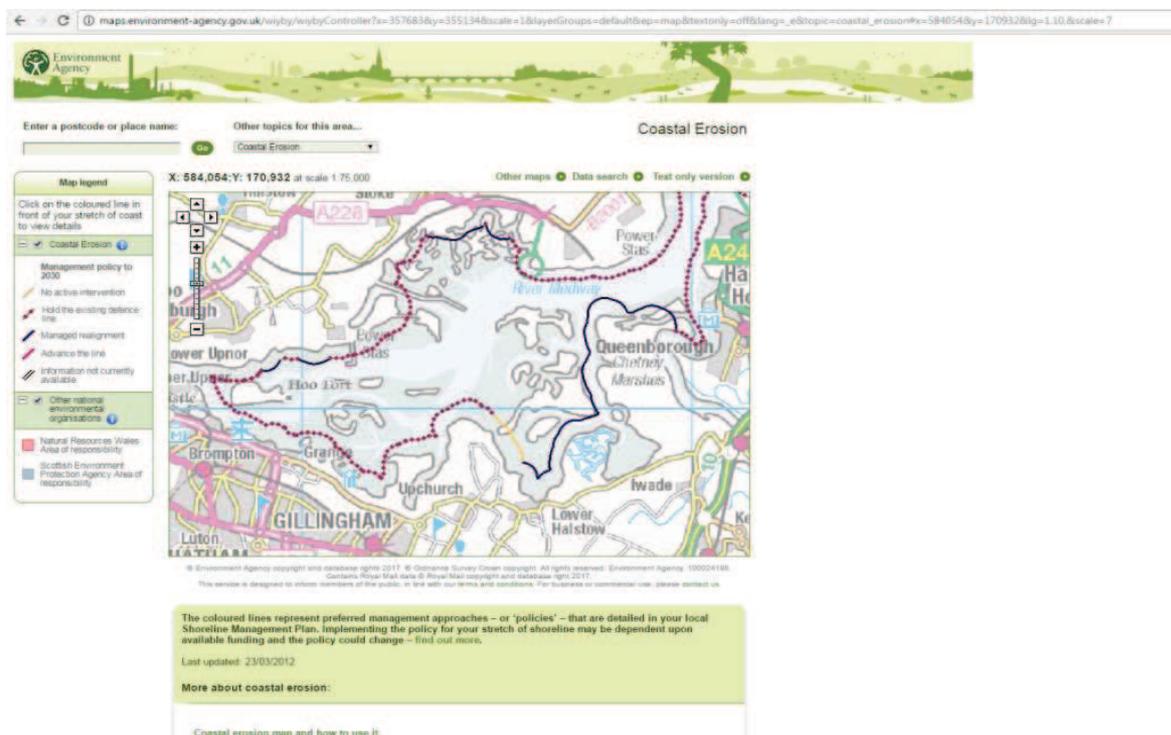


Figura 2.15. Interfaz de la aplicación *Coastal Erosion*.
Fuente: <http://maps.environment-agency.gov.uk/>

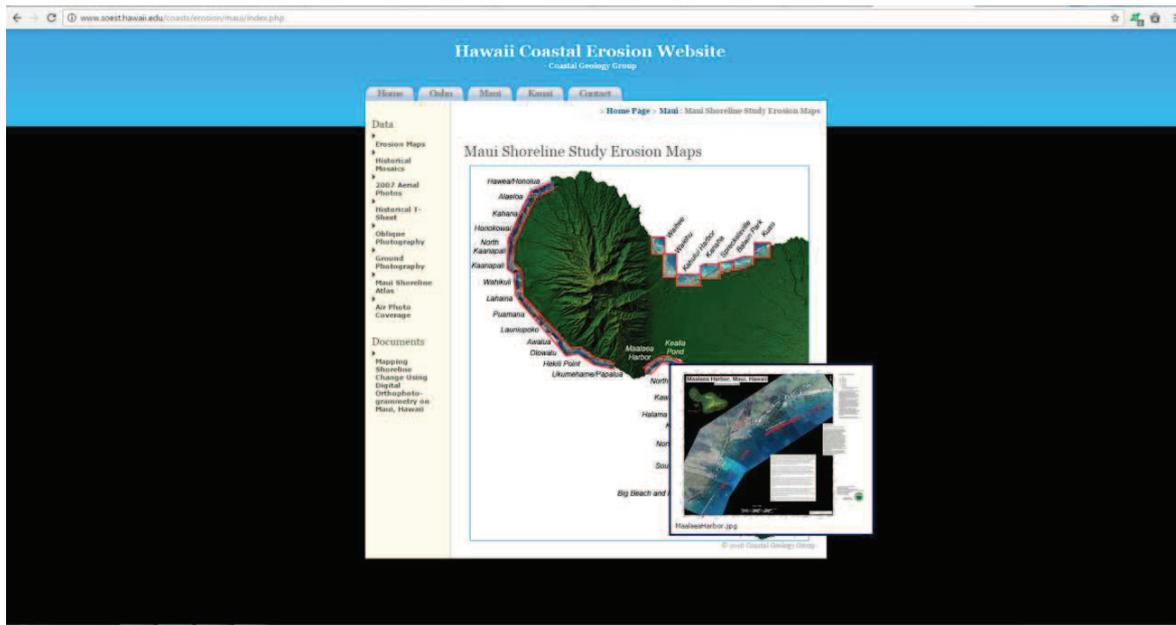


Figura 2.16. Interfaz de la aplicación *Maui Shoreline Study Erosion Maps*.
Fuente: <http://www.soest.hawaii.edu/>

El resto de los visores poseen funcionalidades de visualización más desarrolladas. Cabe destacar por sus contenidos y sus interfaces, los visores desarrollados por el *U.S. Geological Survey (USGS)*²³, *Massachusetts Shoreline Change Browser*²⁴ e *Ihcantabria*²⁵ (Figuras 2.17, 2.18 y 2.19). Sus herramientas de navegación son avanzadas, incluyendo además de información vinculada a los cambios en la línea de costa y tasas de erosión, una gran cantidad de información de ayuda a la interpretación de las mismas, si bien la aplicación *Ihcantabria*, desarrollado para la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), merece una mención especial, pues posee una interacción algo mayor con el usuario ya permite el acceso interactivo a la información de cada punto de cálculo (Figura 6).

²³ <https://coastalmap.marine.usgs.gov/flexWeb/national/ShoreLC/>

²⁴ http://maps.massgis.state.ma.us/map_ol/czm_shorelines.php

²⁵ <http://www.c3a.ihcantabria.com/>

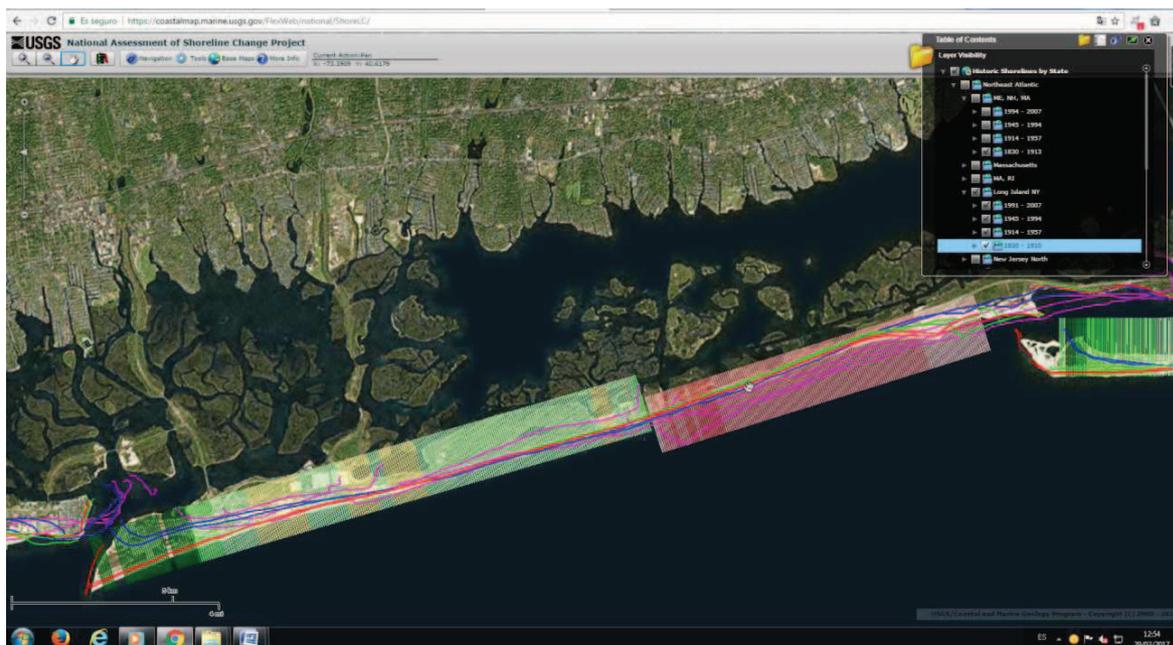


Figura 2.17. Interfaz de la *National Assessment of Shoreline Change Web Mapping Application*.
Fuente: <https://coastalmap.marine.usgs.gov>

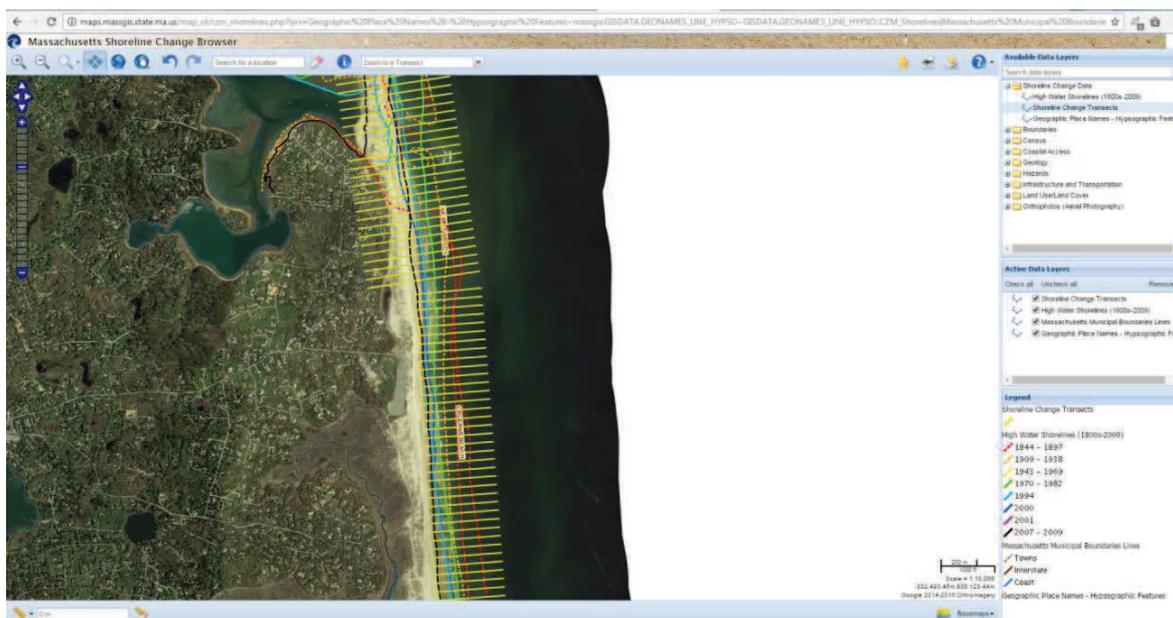


Figura 2.18. Interfaz del *Massachusetts Shoreline Change Browser*.
Fuente: <http://maps.massgis.state.ma.us>

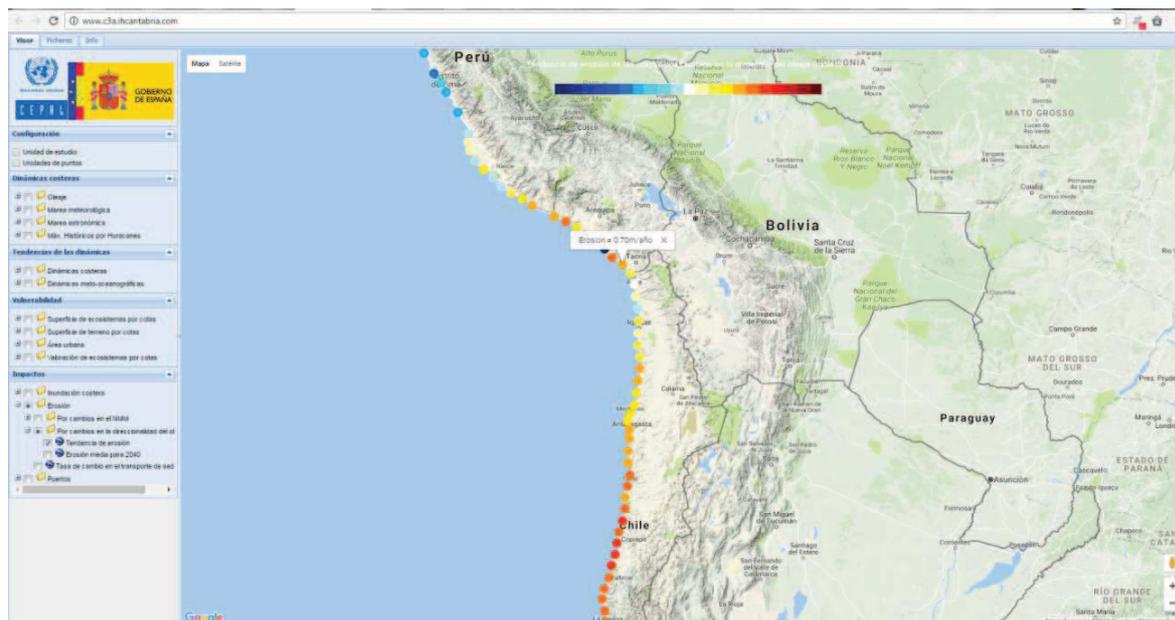


Figura 2.19. Interfaz de la aplicación IhCantabria.

Fuente: <http://www.c3a.ihcantabria.com/>

Nombre y URL	Descripción	Contenido temático	Funcionalidades	Nivel de interacción con el usuario
<p>Baid Coastal Erosion <i>http://irpsrvgis25.utep.edu/BaidCoastalErosion/</i></p>	<p>Desarrollado en el marco del proyecto Barrow Area Information Database (BAID) iniciado en junio de 2000 y actualmente incluye la ubicación de más de 12.000 parcelas de investigación y localizaciones de instrumentos. Este esfuerzo continuo incorpora tanto nuevos lugares de investigación como sitios de muestreo que datan de la década de 1940.</p>	<p>Muestra tasas y líneas de erosión calculadas a medio y corto plazo para Barrow (Alaska)</p>	<p>Visualización y Dibujo</p>	<p>Nivel de Información. No permite la consulta ni el acceso a <i>GetFeatureInfo</i>.</p>
<p>National Assessment of Shoreline Change Web Mappin application <i>https://coastalmap.marine.usgs.gov/FlexWeb/national/shoreLC/</i></p>	<p>Desarrollado por la U.S. Geological Survey (USGS) en el marco del proyecto Coastal and Marine Geology Map</p>	<p>Muestra tasas de erosión y líneas de costa para corto y medio-largo plazo para la costa estadounidense (desde 1830)</p>	<p>Visualización y navegación</p>	<p>Nivel de información. No permite consulta del <i>GetFeatureInfo</i>. No permite exportación de datos</p>
<p>Coastal erosion <i>http://maps.environment-agency.gov.uk/wiyby</i></p>	<p>Desarrollado por la Environment Agency del Reino Unido. Forma parte del Plan de Lucha contra la erosión y representa la estrategia a seguir.</p>	<p>Se representan enfoques de gestión preferidos - o "políticas" - que se detallan en su Plan de Gestión de Litoral local. No representa tasas de erosión en sí pero es posible acceder a esta información para un punto concreto.</p>	<p>Visualización, navegación</p>	<p>Nivel de información y consulta básica. No permite el acceso al <i>GetFeatureInfo</i>. No permite exportación de datos.</p>

Nombre y URL	Descripción	Contenido temático	Funcionalidades	Nivel de interacción con el usuario
<p>North Carolina Erosion</p> <p>https://deq.nc.gov/about/divisions/coastal-management/coastal-management-oceanfront-shorelines/oceanfront-construction-setback-erosion-rate</p>	<p>Desarrollado por N.C. Division of Coastal Management, Policy & Planning Section, 2014</p>	<p>Muestra información de las zonas que progredan erosionan o se mantienen estables para el período 1979-2014</p>	<p>Visualización y Navegación básicas</p>	<p>Nivel de información. No permite el acceso al <i>GetFeatureInfo</i>. No permite exportación de datos.</p>
<p>Massachusetts Shoreline Change Browser</p> <p>http://maps.massgis.state.ma.us/map_ol/czm_shorelines.php</p>	<p>Desarrollado por la Office of Energy and Environmental Affairs <u>Energy</u> en el marco del Proyecto CZM's Shoreline Change Project</p>	<p>Muestra sobre las distancias netas del movimiento de la línea de costa, las tasas de cambio y los valores de incertidumbre. Recopila además otra información costera y de base.</p>	<p>Visualización y navegación-Consulta de información</p>	<p>Información y consulta. Permite acceso al <i>GetFeatureInfo</i>.</p>
<p>Maui Shoreline Study Erosion Maps</p> <p>http://www.soest.hawaii.edu/coastal/erosion/maui/index.php</p>	<p>Elaborado por el Grupo de Geología Costera de la Universidad de Hawaii</p>	<p>Muestra mapas que representan tasas de erosión y líneas de costa (desde 1900) para diferentes zonas de la isla de Maui.</p>	<p>Visualización de mapas en formato <i>pdf</i>.</p>	<p>Nivel de formación básico.</p>
<p>Sistema de Información para el seguimiento de la gestión costera</p> <p>http://gis.inveemar.org.co/erosioncostera/</p>	<p>Forma parte del Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia – PNIEC, Caribe colombiano.</p>	<p>Muestra zonas de acreción y erosión junto con otra información costera.</p>	<p>Visualización.</p>	<p>Información primer nivel. No permite acceso al <i>GetFeatureInfo</i>.</p>
<p>Ihcantabria</p> <p>http://www.c3a.ihcantabria.com/</p>	<p>Desarrollado por la Universidad de Cantabria para la representación de información contenida en la base de datos del proyecto "Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe" (CEPAL)</p>	<p>Representa varias variables de dinámicas costeras, la influencia de la variabilidad climática, información diversa sobre la vulnerabilidad de las costas (medio físico y socioeconómico), la configuración física de las mismas y los impactos y riesgos previsibles. Único que muestra tendencias futuras de erosión</p>	<p>Visualización y navegación Consulta de información</p>	<p>Información Consulta de información Permite acceso a <i>GetFeatureInfo</i>.</p>

Tabla 2.5. Visores de erosión analizados. Contenidos, funcionalidades y nivel de interacción con el usuario.

Fuente: Elaboración propia

2.4.2. EXPERIENCIAS DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN EL DESARROLLO DE GEOVISORES WEB

Los geovisores web han constituido la opción desarrollada por el Grupo de Investigación para la difusión de los proyectos en los que participan sus miembros, al menos de forma sistemática, en la última década (Ojeda y Cabrera, 2006; Ojeda et al., 2010, 2013, 2015). En este sentido la experiencia desarrollada se ha basado en el diseño de 3 prototipos de geovisores web:

- ⇒ **Visor 2D/3D Condor**²⁶: fue implementado inicialmente para facilitar la geovisualización del conjunto de información del litoral andaluz, almacenada en el Subsistema de Litoral y Medio Marino -SSLMM- de la Consejería de Medio Ambiente²⁷, previamente mencionado. Su principal característica es la posibilidad de representar superficies (2.5D), es decir, la generación de vistas tridimensionales e integrar objetos 3D gracias a la utilización intensiva de un Modelo Digital de Elevaciones que integra el medio terrestre con el marino (ver Figura 2.20). Este hecho posibilita en el visor el desarrollo de varias funcionalidades (generación de mapas hipsométricos de alturas; la representación de curvas de nivel; la realización de perfiles topográficos del terreno tanto en las zonas emergidas como sumergidas, calcular de pendientes, etc.). Es destacable también la herramienta de simulación y visualización tridimensional de las oscilaciones del nivel de las aguas marinas sobre la topografía emergida y sumergida. Aún siendo el más antiguo y necesitar la instalación de un *plugin* (similar a *Google Earth*) para su utilización en los navegadores web más utilizados (Explorer, Mozilla...), la capacidad de representación tridimensional sigue siendo esencial en muchas de las investigaciones realizadas para facilitar la comprensión de los contenidos.

²⁶ <http://copernico.cica.es/visores.html>

²⁷ <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>

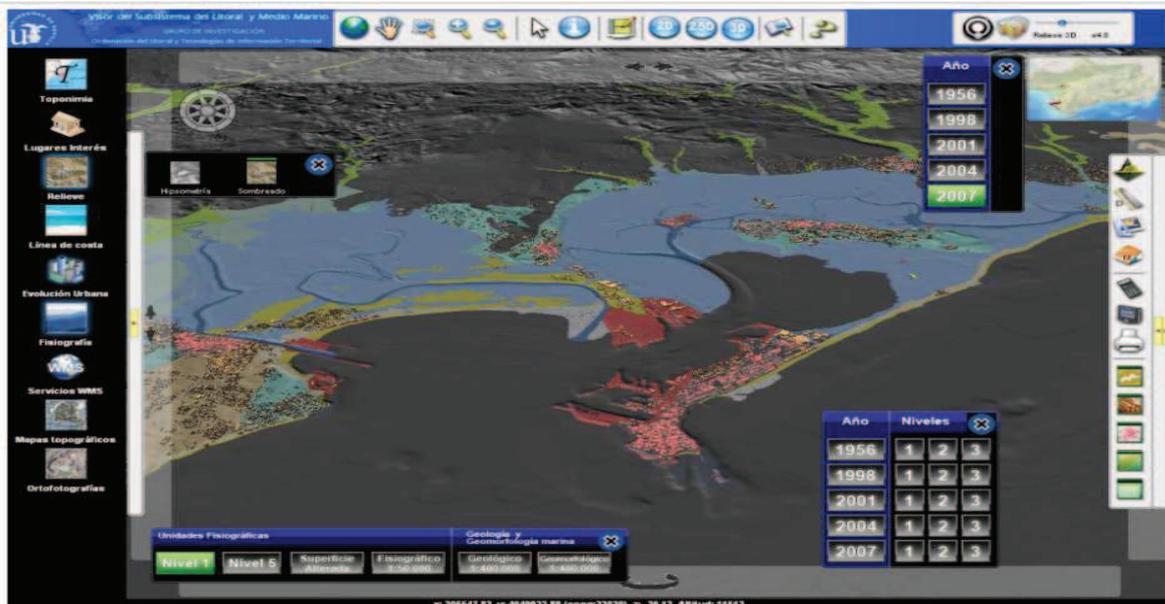


Figura 2.20. Interfaz del Visor Cónдор.
Fuente: <http://copernico.cica.es/visores.html>

⇒ **Global Climate Monitor**²⁸: fue diseñado para acceder a las series de datos climáticos globales generadas y difundidas por la *Climate Research Unit (CRU)*. Incluye un total de 30 indicadores derivados de 5 variables primarias: precipitaciones mensuales, temperaturas medias mensuales, temperaturas máximas medias mensuales, temperaturas mínimas medias mensuales y evapotranspiración potencial mensual (Álvarez et al., 2014; Álvarez, 2016). El visor posee, además, herramientas de construcción de gráficos para la explotación y exploración temporal de los datos (ver Figura 2.21).

²⁸ <http://www.globalclimatemonitor.org/>

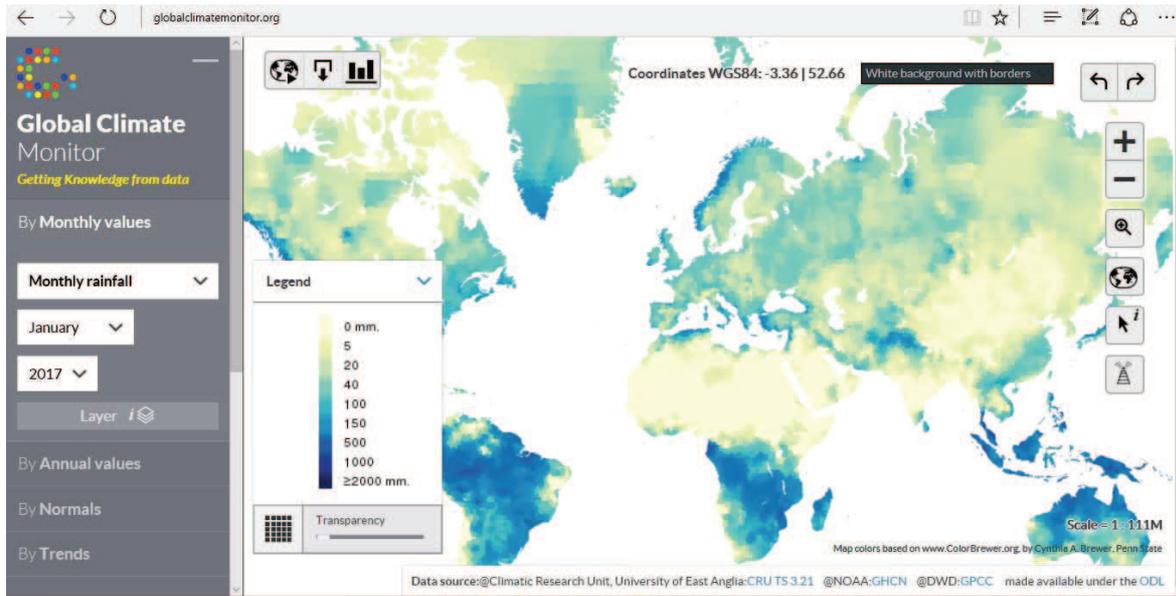


Figura 2.21. Interfaz de *Global Climate Monitor*.
Fuente: <http://www.globalclimatemonitor.org/>

⇒ **Gis and Coast**²⁹: diseñado y desarrollado por el Grupo de Investigación, el visor es una herramienta de geovisualización, consulta y participación activa para la difusión de datos e indicadores costeros (Ojeda et al, 2016), es decir, permite la máxima interacción con el usuario. Este ha sido el prototipo principal de visor desarrollado por el equipo de trabajo en el marco de diferentes proyectos de investigación y **será el utilizado para la difusión de los resultados de esta Tesis Doctoral** (ver Figura 2.22). En este aspecto, destacan los visores resultados de los 2 proyectos I+D+i previamente comentados^{30 31}.

²⁹ <http://www.visor.gis-and-coast.org/>

³⁰ <https://www.nacional-2014.gis-and-coast.org/>

³¹ <https://www.excelencia.gis-and-coast.org/>

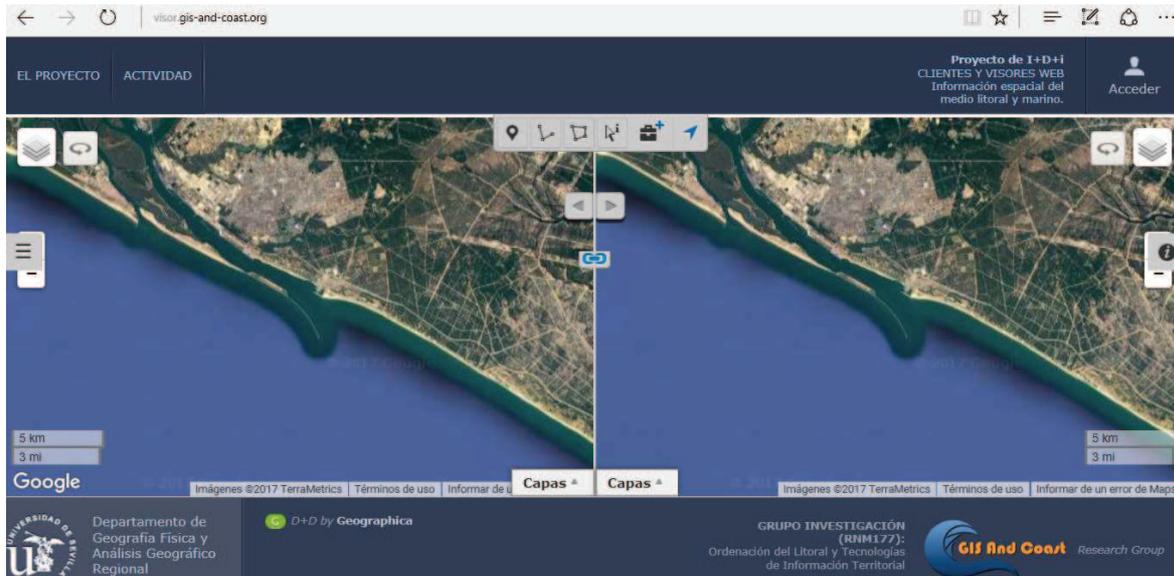


Figura 2.22. Interfaz del visor *Gis and Coast*.
Fuente: <http://www.visor.gis-and-coast.org/>

Los 3 prototipos señalados, productos del Grupo de Investigación, se alimentan de servicios interoperables del *Open Geospatial Consortium* y posibilitan la descarga de datos en varios formatos (*KML*, *CSV*, etc.). De igual modo, permiten la representación de servicios interoperables externos, que pueden ser cargados en el visor, siendo de utilidad fundamental para la interpretación de las tasas de erosión. Todos los visores desarrollados por el Grupo de Investigación garantizan el nivel 1 de interacción con el usuario, siendo el prototipo *Gis and Coast* el único visor que permite los 3 niveles de interacción. Estas funcionalidades colaborativas hacen que, además de ser usado para la presentación y exploración de los resultados, constituya una herramienta útil para el chequeo, control de calidad y la interpretación de los resultados de esta Tesis Doctoral.

Cabe destacar el acceso de todos los visores al *GetFeatureInfo* e incluso a la explotación, consulta y a los datos a través de herramientas de construcción de gráficos. Es el caso de *Global Climate Monitor* y *Gis and Coast*, este último a través de una herramienta de construcción de filtros *CQL* con la que el usuario especializado podrá incluso construir indicadores estadísticos a demanda. Esta herramienta junto con el resto de funcionalidades del prototipo utilizado serán descritas de manera más detallada en el apartado 3.6.2.

2.5.- CONSIDERACIONES FINALES

Del análisis del estado de la cuestión realizado en este capítulo ha sido posible extraer algunas **consideraciones generales** que han sustentado la definición de **las hipótesis y objetivos planteados** en esta Tesis Doctoral.

⇒ **En relación a la fotointerpretación, identificación y digitalización de la línea de costa para el cálculo de las tasas de erosión:**

- La playa es un elemento dinámico y cualquier indicador de línea de costa que se encuentre en el perfil activo de la playa dará **problemas para su comparación** con otra fecha (difícilmente estarán en el mismo estado morfodinámico). El análisis realizado demuestra que son escasas las experiencias de cálculo e interpretación para **espacios amplios** (regional, nacional) donde la fotointerpretación de la línea de costa haya sido realizada por **un solo fotointérprete** (aspecto necesario para garantizar la comparabilidad de resultados). Además, la mayor parte de las experiencias se basan en la medición de las tasas utilizando **un solo proxy**.
- En los antecedentes consultados, la fotointerpretación de la línea refleja fidedignamente la geometría del *proxy* elegido, por lo que las líneas de costa digitalizadas presentan una **amplia variabilidad y sinuosidad geométrica en escasos metros** debido a la incidencia puntual de los procesos erosivos extremos o a la acción antrópica, lo que enmascara los procesos de erosión a medio-largo plazo.
- Los procesos de erosión en las playas y las causas de las oscilaciones de la línea de costa actúan a diferentes **escalas espacio-temporales**, las cuales, además, son definidas con diversos criterios según los diferentes especialistas (geólogos, geomorfólogos, cuaternaristas, ingenieros de costas, etc.), escalas de análisis (global, regional, local) e interés temático (cambio climático, riesgos...). Por ello, dejando al margen los cambios a **escala geológica**, ha resultado oportuno dar un significado específico y concreto a los conceptos de **cambios episódicos** y a **corto, medio y largo plazo**.

Por todo ello y en relación a los precedentes comentados, en esta Tesis Doctoral se ha decidido, desde un punto de vista metodológico, que la

digitalización de la líneas de costas se debería realizar a **escala detallada 1:2.500 para toda Andalucía**. Además la digitalización de las líneas de costa debería realizarse con una **línea suavizada**, omitiendo parte de estas pequeñas oscilaciones puntuales que aparecieran en ella, ya que se parte de la hipótesis de que en una evolución a largo plazo (55 años) la incidencia puntual de los procesos erosivos extremos o ligados a la acción antrópica que las generan variarán de posición a lo largo del período temporal y, con esta propuesta (línea suavizada), se evalúa de una manera más fiel el **retroceso/avance generalizado** de la costa a medio/largo plazo.

Por otra parte, en relación al **período temporal de esta Tesis (1956-2011)**, ninguno de los subperíodos de análisis elegidos analizan períodos temporales inferiores a la década de años, con lo que, globalmente, la escala temporal de este análisis podría calificarse como un estudio de la evolución de la línea de costa a **medio-largo plazo**. Dentro de estas escalas se ha denominado como **período de referencia** al cálculo de tasas entre los años **1977-2011** (incluyendo casi 33 años) y se ha comparado con un período **histórico pasado (1956-1977)**, así como con un período **reciente** más pequeño (**2001-2011**) y un período equivalente al histórico (en torno a dos décadas) entre las fechas **1977-2001**.

⇒ **En relación al cálculo de las tasas de erosión:**

- La metodología para el cálculo de las tasas de erosión depende de la disponibilidad de fuentes. Del análisis de las experiencias previas se puede concluir que el uso de **ortofotografías** se erige como la **fuentes óptima** y casi única (posibilidades métricas retrospectivas) para desarrollar estudios de erosión a medio-largo plazo. Esta fuente solo ha sido posible a partir de la generalización de vuelos fotogramétricos digitales y la ortorrectificación digital, sólo disponibles en España para las dos últimas décadas. La posibilidad de disponer en Andalucía de ortofotografías para períodos históricos (1956 y 1979) es la causa que sustentó la hipótesis de su utilización en este trabajo de investigación.
- La mayor parte de los trabajos previos en la costa de Andalucía se han realizado sobre la base de fotografías aéreas de necesaria georreferenciación manual (los más antiguos) o mediante el uso de puntos de control y rectificaciones con polinomios, cuyas ecuaciones de

transformación y errores son específicas para cada fotograma. La aparición y facilidad de acceso a ortofotografías ha sido más reciente y no se han localizado experiencias en el cálculo de tasas de erosión para la totalidad de la costa de Andalucía (salvo los precedentes realizados por el Grupo de Investigación), abarcando, como máximo, ámbitos de estudio a nivel provincial o algo superiores y con una gran variabilidad en los períodos temporales de análisis, diferentes fotointérpretes y diferentes criterios de fotointerpretación. Todo ello ha restado comparabilidad a los resultados y ha imposibilitado tener una visión de conjunto del comportamiento de las oscilaciones de la línea de costa para la totalidad de la costa de Andalucía.

- En las experiencias previas en general se utilizan diferentes criterios (*proxy*) para la identificación de la línea de costa, siendo mayoritarios los que utilizan elementos o características (vegetación, marcas de humedad en la playa, etc.) que se puedan reconocer en campo o sobre fotogramas e imágenes de satélite (***feature-based proxy***). En España y Andalucía ha predominado, entre ellos, la marca húmeda dejada por el oleaje en la última pleamar que, si bien es aceptable aunque con limitaciones en el mediterráneo (régimen micromareal), genera bastantes problemas en los frentes costeros atlánticos por su régimen macromareal. En la provincia de Cádiz, sin embargo, hay experiencias previas con el uso *proxies* que se ubican en el límite interior de la playa (contacto playa/duna costera), más recomendable en estudios a medio-largo plazo por su capacidad de aislar las modificaciones del perfil activo de la playa.
- En las experiencias analizadas de cálculo de tasas de erosión con ortofotografías aéreas y fotogramas rectificadas se ha utilizado masivamente la herramienta para ArcGis® ***Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*** desde su aparición al final de la década de los 90.
- En la mayoría de estos antecedentes es difícil encontrar casos (no en Andalucía) donde se asocie el **cálculo de tasas de erosión a modelos de datos**, aprovechando el costoso proceso de interpretación y digitalización del *proxy* para incorporar diversa información temática asociada (presencia/ausencia de dunas, acantilados, infraestructuras, etc.), lo que limita notablemente la potencialidad y el uso de estos datos para distintas aplicaciones y cálculos de indicadores de gran interés.

En relación a los precedentes comentados, en esta Tesis Doctoral se ha decidido, metodológicamente, que la **digitalización de la líneas de costa** se debería realizar por **un solo fotointérprete** para garantizar la “comparabilidad” y para los dos **2 proxies** más utilizados dentro del tipo “**feature-based proxy**” para el cálculo de las tasas con *DSAS*: (i) el **límite interior de la playa** (contacto playa/duna costera), más recomendable en estudios a medio-largo plazo y que se debería utilizar en el análisis e interpretación de las tasas, y (ii) la **marca húmeda** dejada por el oleaje **en la última marea alta**, que se usaría como dato de contraste y en zonas donde el primer *proxy* generase problemas (limitación de playas por infraestructuras, etc.).

Igualmente, ante la ausencia de experiencias previas, parecería recomendable utilizar **el proceso de fotointerpretación a escala detallada** sobre la **ortofotografía** para incorporar un conjunto elevado de **atributos temáticos a las líneas de costa**. Para ello, sería necesario diseñar un **modelo de datos espacial** implementado en un gestor de base de datos espacial de **código abierto: PostgreSQL/PostGIS**. La hipótesis que sustentaba esta decisión era la posibilidad de obtener para toda la costa andaluza, además de tasas de erosión, una serie de **indicadores e índices** de gran interés estadístico, territorial y ambiental (sensibilidad de playas de uso turístico a los procesos erosivos, por ejemplo), a partir de sencillas sentencias SQL y gracias a la incorporación de dichos atributos temáticos al modelo de datos de líneas de costa, y a las tasas de erosión calculadas.

⇒ **En relación a la difusión y visualización:** de los precedentes y experiencias previas analizadas en relación con la difusión web de los resultados de estudios centrados en el análisis de tasas de erosión, se puede concluir que:

- El uso de **geovisores web** constituye hoy en día uno de los elementos esenciales para la difusión de resultados de cualquier proyecto de investigación y se presenta como la mejor opción para la presentación de resultados de esta Tesis Doctoral por el enorme volumen de datos esperado y su escala espacial, lo cual hace inviable su visualización y análisis en formatos clásicos (mapas).
- Muchas de las aplicaciones web son desarrolladas en arquitecturas propietarias (Google Maps, ArcGis Server, etc.), aunque existen experiencias con software “*open source*” y **servicios interoperables**

OGC, que consideramos más adecuados en el contexto científico y con potencialidades futuras obvias: control de todo el proceso de difusión, posibilidad de reutilización del trabajo de desarrollo, etc.

- Se han identificado varios antecedentes de difusión mediante el uso de geovisores web de los resultados asociados al cálculo de las tasas de erosión. En la mayoría de experiencias analizadas se ha observado una **escasa posibilidad de interacción del visor con el usuario final**, especialmente si este es un usuario técnico o científico. El usuario puede visualizar espacialmente las tasas pero en la mayoría de los casos no puede acceder a la exploración interna de los datos o realizar consultas específicas.

Del análisis de las experiencias previas se han podido extraer un conjunto de conclusiones en relación a la difusión web de los resultados que justifican gran parte de las hipótesis de partida y objetivos planteados en este trabajo.

Por una parte, ha quedado claro que esta opción (**difusión web**) es casi **la única posible por las características del análisis planteado para el cálculo de tasas de erosión de Andalucía**. La utilización de diferentes criterios (2 *proxies*) para definición de las líneas de costa, la escala de detalle (1:2.500), los diferentes períodos de análisis y la extensión de la costa expuesta de Andalucía (917 Km.) harían inviable cualquier otra opción convencional, al multiplicar el número de mapas necesarios para evaluar el trabajo realizado.

Por ello se ha pensado que, en este contexto, se podría aprovechar la experiencia del Grupo de Investigación RNM-177 (al que pertenece el autor) en el desarrollo de geovisores web reutilizando algunos de los ya existentes (<http://www.visor.gis-and-coast.org/>), e incorporándole funcionalidades específicas adaptadas a la temática de este trabajo de investigación. De esta forma se garantizaría, además, el acceso a los resultados a través de **servicios interoperables OGC** (*WMS, WMTS, WFS*, etc.), adecuándose a las especificaciones de la directiva *INSPIRE*.

En este sentido, aunque para el desarrollo de los visores sería necesaria **la colaboración de otros investigadores del Grupo de Investigación**, la integración del autor en el equipo de diseño y desarrollo de los mismos sería una condición necesaria

para garantizar la adecuada difusión de los resultados por 3 motivos básicos que condicionarían, además, parte del desarrollo y estructura de esta Tesis Doctoral:

- ⇒ Dado que se pretende optar por la integración de todos los datos y resultados en un **gestor de base de datos espacial de código abierto (PostgreSQL/PostGIS)**, la estructura del visor y las funcionalidades del mismo debían ser tenidas en cuenta en todas las fases de diseño e implementación del **modelo de datos** (semiología, formatos de datos), modelo de implantación (puntual, superficial, poligonal), etc.
- ⇒ En la fase final de desarrollo del visor web (estructuración de los servicios en el visor, generación de información adicional explicativa en *pdf*, criterios de selección, selección de representación gráficas, etc.) **la labor de autor es crítica**.
- ⇒ Por último, el visor desarrollado y sus funcionalidades colaborativas constituirían, además, una magnífica herramienta en procesos de investigación científica colaborativa. En este caso específico, el visor sería de gran ayuda no sólo como instrumento de **visualización de resultados** sino, además, como **herramienta útil para el chequeo, control de calidad e interpretación** de los mismos.

La propuesta metodológica y resultados de esta estrategia de difusión web puede observarse en los epígrafes 3.2 y 4.2 del presente documento, correspondientes a la metodología y resultados, respectivamente.

CAPÍTULO 3

Fuentes de datos y metodología

Punta de Tarifa (Tarifa, Cádiz)



CAPÍTULO 3

FUENTES DE DATOS Y METODOLOGÍA

El presente capítulo aborda uno de los elementos esenciales de la Tesis Doctoral: las **fuentes de datos** y la **metodología**. Se describen detalladamente las fuentes de datos utilizadas, tanto principales como complementarias y se hará hincapié en las particularidades técnicas que caracterizan a cada uno de los productos obtenidos de los **vuelos fotogramétricos** (fotogramas, **ortofotografías** y servicios interoperables). Éstos, como ya se comentó en el estado de la cuestión, constituyen la única fuente con carácter retrospectivo que permite medir el desplazamiento de la línea de costa a escalas de detalle a medio-largo plazo. Por ello, serán los utilizados como referencia geométrica básica para la digitalización de las líneas de costa.

Igualmente se desarrollan de forma detallada todas las fases del **proceso metodológico** seguido (ver Figura 3.1), desde las labores previas del marco de trabajo hasta los diversos controles de calidad de los datos generados, incluyendo los procesos propios del **levantamiento de líneas de costa**. De igual forma, se detalla de forma precisa el **modelo de datos de línea de costa de partida** previamente desarrollado como labor del Grupo de Investigación e implementando en una base de datos espacial gestionada con **PostgreSQL/PostGIS**. Las diferentes líneas de costa digitalizadas en la presente Tesis adoptan el **mismo modelo de datos**, actualizándose un conjunto de **tablas** para cada fecha e incorporando al modelo otro conjunto de **tablas de nueva creación**.

Una vez digitalizadas las líneas de costa, se detallará el procedimiento de obtención de los **resultados** derivados de las mismas, caracterizados según su naturaleza, en 2 tipos. En primer lugar, el **análisis cuantitativo de las tasas de erosión** para todos los períodos contemplados, justificando el método idóneo de cálculo en función a las características de los datos. En segundo lugar, la elaboración de **indicadores temáticos**, para generar un amplio abanico de indicadores de interés científico y gran utilidad práctica (playa útil, sensibilidad de playas, etc.). Seguidamente, se procede a la integración de los resultados obtenidos en el **modelo de datos final**, cuyas tablas gestionadas por **PostgreSQL/PostGIS** serán la base para la explotación temática, acceso y difusión de las mismas.

Por último, se expondrá la metodología seguida para garantizar el **acceso y difusión web** de los resultados a través de un servidor web de **servicios OGC** (*geoserver*) así como de 2 aplicaciones integradas en el geovisor web: un **geovisor web para usuarios generalistas** y una **herramienta para usuarios especializados**.

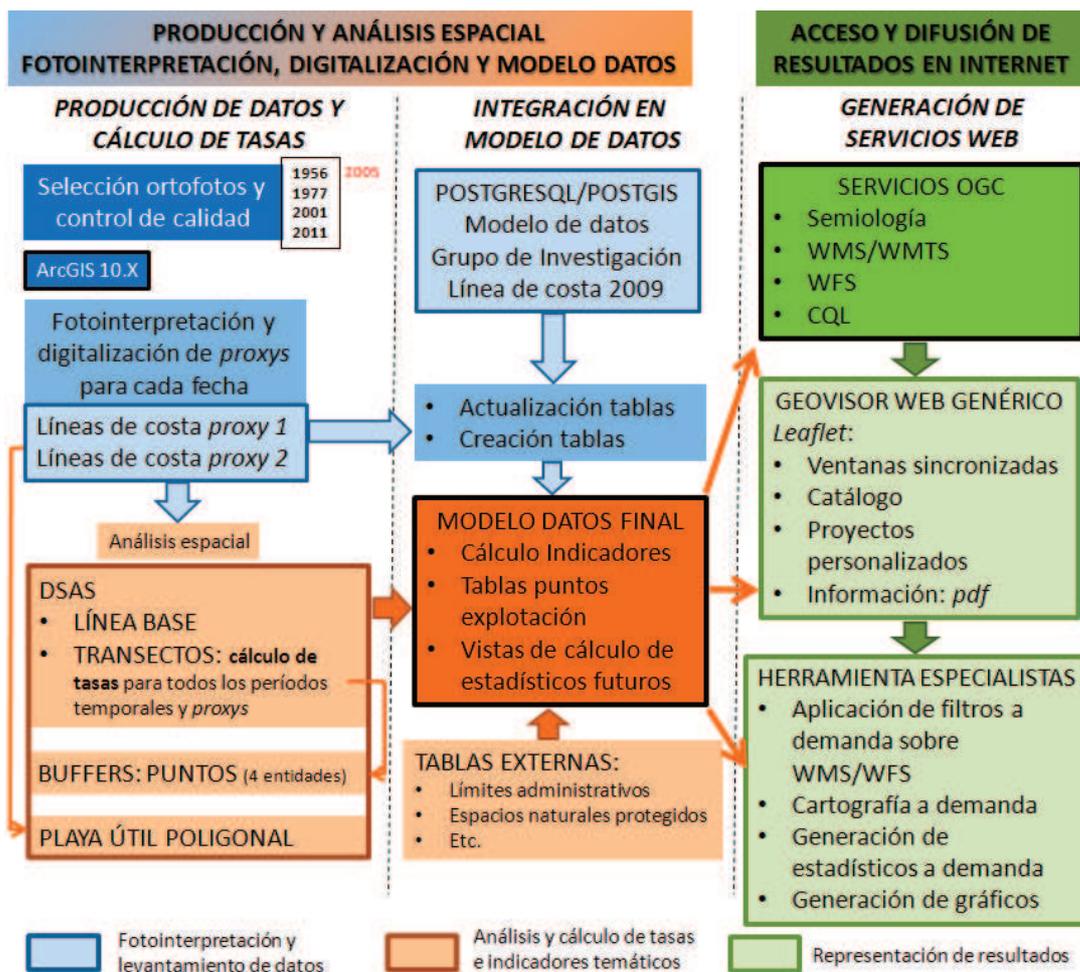


Figura 3.1. Esquema del proceso metodológico de la Tesis Doctoral.
Fuente: elaboración propia.

3.1.- FUENTES

Como ya se detalló en el Capítulo 2, los **vuelos fotogramétricos** conforman la fuente de datos más fiable para el análisis de las tasas de erosión en Andalucía, permitiendo la **identificación** (en formato papel o en digital) **de elementos** de la propia realidad observada que se utilizarán como **proxies**. A ello se le une el hecho de ser la única fuente de datos con **carácter retrospectivo**, haciendo posible el seguimiento y estudio de la evolución de la línea de costa a **medio/largo plazo** desde la perspectiva temporal y a **escala de detalle** desde la espacial. Por todo ello, es la principal fuente utilizada para la presente Tesis Doctoral.

No obstante, son varios los productos derivados de un vuelo fotogramétrico (fotogramas, ortofotografías, modelos digitales de elevaciones, servicios interoperables) cuyas características y procesos de tratamiento difieren considerablemente. Por ello, se considera necesaria la descripción previa de las características de los productos derivados de los vuelos fotogramétricos y el papel que cada uno de ellos ha jugado en el desarrollo de esta Tesis.

3.1.1.- INTRODUCCIÓN. PRODUCTOS DERIVADOS DE UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO

Históricamente, los vuelos fotogramétricos han presentado dos vertientes claramente diferenciadas, la militar y la civil, si bien el desarrollo de las aplicaciones militares han supuesto mejoras posteriores en las segundas (Fernández, 2000). En este caso, las aplicaciones civiles en el estado español han sufrido un proceso de generalización en los últimos años a partir de la programación temporal de vuelos fotogramétricos por la Administración (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea -PNOA-), y como consecuencia de la adaptación a la *Directiva Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE)* que dispone las reglas generales para el establecimiento de una *Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea*, persiguiendo un nivel de detalle máximo de la información geográfica a la vez que una máxima difusión entre los diferentes agentes sociales que la necesiten. Los principales productos derivados de un vuelo fotogramétrico (analógico o digital) son el fotograma, la ortofotografía y los servicios *Web Map Service (WMS)*, que serán descritos en los apartados siguientes.

3.1.1.1.- FOTOGRAMA

Los **vuelos fotogramétricos históricos**, cuyas funciones primordiales se centran en la obtención de información territorial y medición precisa sobre fotografías aéreas, han utilizado **cámaras fotogramétricas analógicas**. Las características espaciales, espectrales y radiométricas del producto obtenido en formato analógico (emulsiones fotográficas y papel) dependían de la altitud del vuelo, distancia focal y características de la cámara, así como de las características y composición de las películas montadas en la misma (ver Figura 3.2). Este producto resulta de gran utilidad, dado que las características de la toma de fotografía y del vuelo (metadatos) venían detalladas en los márgenes de las mismas (marcas fiduciales, fecha, nivel, reloj, altímetro, distancia focal, etc.).

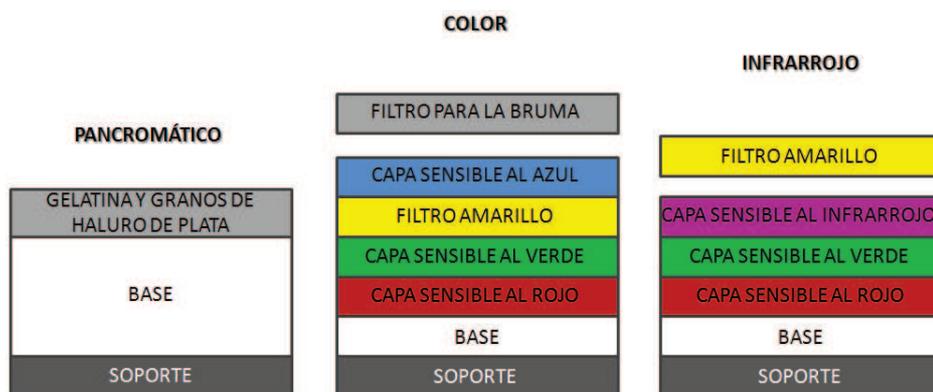


Figura 3.2. Esquema de la composición de las películas en escala de grises (pancromático), color (RGB) e infrarrojo color (IRC).

Fuente: modificado de Fernández, 2000.

Para su disposición en formato digital era necesario el uso de **escáneres fotogramétricos** de alta resolución, los cuales, pese a respetar razonablemente la geometría, podían alterar significativamente la radiometría y tamaño de píxel de la fotografía en función a las características de los mismos (ver Figura 3.3). Este producto final (fichero digital procedente del escáner) sólo será **utilizado en la Tesis para extraer los metadatos de los vuelos históricos**, esenciales para el correcto cálculo e interpretación de los resultados obtenidos.



Figura 3.3. Fotogramas originales escaneados procedentes del vuelo fotogramétrico de 1956.
Fuente: elaboración propia a partir de datos del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA).

Desde la aparición de los **vuelos fotogramétricos digitales**, las fotografías se realizan con **sensores multibanda** capaces de capturar **imágenes** en diferentes zonas del espectro electromagnético (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano), permitiendo la fotointerpretación en pancromático, color o infrarrojo (ver Figura 3.4). De forma automática, cada captura produce una **imagen digital** con unas características espectrales, radiométricas y espaciales previamente establecidas, sin necesidad de tratamiento postproceso que altere las condiciones originales de las mismas. De forma paralela, la incorporación de un GPS diferencial y un sistema de navegación inercial en el avión proporcionan para cada fotograma la posición exacta del centro geométrico mismo (GPS) y la disposición de la cámara (INS), respectivamente, además de una serie de información y metadatos referentes al vuelo que, finalmente, se asocian a ficheros que recogen los centroides de los fotogramas. **Estos ficheros de centroides que contienen la información de cada fotograma son los utilizados para la obtención de los metadatos.**



Figura 3.4. De izquierda a derecha, captura de imágenes en pancromático, color (RGB) e infrarrojo cercano (IRC).
Fuente: Stereocarto S.L.

El uso de las fotografías aéreas, ya sean de carácter analógico o digital, supone la asunción de ciertos errores intrínsecos derivados de la toma fotográfica y del tratamiento de la fotografía aérea (Fernández, 2000):

- ⇒ **Error geométrico:** heredado de la perspectiva cónica de la cámara o sensor utilizado, genera problemas de deformación en zonas de relieve importante, problema en parte solucionado por la naturaleza plana del ámbito litoral.
- ⇒ **Error de escala:** provocado por el relieve del terreno y su distinta proximidad al objetivo de la cámara o sensor. Así, un mismo objeto aparecerá sobredimensionado conforme más cerca se encuentre del objetivo (muy común en zonas montañosas), y viceversa.
- ⇒ **Error de verticalidad:** propiciado por la posición relativa de los objetos en función al ángulo de toma de la fotografía (paralaje). Mientras que los objetos coincidentes con el nadir de la fotografía muestran una perpendicularidad perfecta, los objetos más cercanos a los bordes muestran abatimientos en sentido opuesto a la línea de vuelo.
- ⇒ **Error de cámara:** intrínseco a las propias características del objetivo de la cámara o sensor.
- ⇒ **Error de continuidad geométrica:** ocasionado por la georreferenciación manual de fotogramas correlativos en áreas de estudio amplias. Los puntos de control, tomados de forma independiente para cada fotograma, pueden no coincidir de forma precisa en las zonas de solapamiento entre fotografías, generando tramos con discontinuidad geométrica.

Por todo ello, en la actualidad se ha optado por el uso de ortofotografías, desarrolladas a continuación.

3.1.1.2.- ORTOFOTOGRAFÍA

Se trata del producto del vuelo fotogramétrico más utilizado en la actualidad, dado que el resultado final se **dispone libre de errores geométricos intrínsecos al proceso de captura de fotografías** desde medios aerotransportados. Estos errores se derivaban de la representación cónica de la realidad (proyección cónica de las fotografías aéreas frente a proyección ortogonal de la cartografía convencional), afectada por limitaciones de perspectiva, deformaciones producidas por el relieve del terreno, falta de verticalidad de la toma fotográfica y distorsiones propias del objetivo de la cámara empleada, implicando errores en los procesos de cálculo de distancias, superficies o ángulos (Fernández, 2000). El proceso necesario para su generación, denominado “ortorrectificación” u “ortoproyección”, consiste en la corrección geométrica de las fotografías aéreas obtenidas del vuelo fotogramétrico, cuya metodología se divide en las siguientes fases (REDIAM, 2016) (ver Figura 3.5):

- ⇒ **Escaneado:** necesario para la disponibilidad de los fotogramas en formato digital cuando el vuelo es de carácter analógico. La calidad visual y resolución espacial de los fotogramas digitales dependerá de las características y resolución del escáner fotogramétrico utilizado. En el caso de las cámaras digitales, las imágenes capturadas son recopiladas de forma automática en formato digital, obviando este proceso.
- ⇒ **Apoyo topográfico:** para la georreferenciación de las imágenes obtenidas, es necesaria la identificación de elementos a pie de campo con coordenadas conocidas (X,Y,Z) y reconocibles en las fotografías aéreas. Sólo de esta manera se pueden vincular dimensionalmente los puntos de la fotografía con los puntos en el terreno. Este apoyo topográfico se ha reducido significativamente con las fotografías aéreas verticales aprovechando la incorporación de GPS y sistemas de navegación inercial (INS) en los aviones
- ⇒ **Aerotriangulación:** se describe como aquel proceso de cálculo de coordenadas X,Y,Z de puntos homólogos sobre el bloque de fotogramas mediante el apoyo topográfico, de tal forma que permite reproducir las posiciones de las fotografías realizadas en el momento en que se tomaron.

Supone un ajuste preciso en la disposición del bloque de fotogramas, que permiten su orientación estereoscópica en los procesos de restitución fotogramétrica, necesaria para la generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

- ⇒ **Modelo Digital de Elevaciones:** la visualización tridimensional del terreno a partir del bloque de fotogramas correlativos previamente orientados (triangulación y apoyo), permite la generación del MDE a partir de varios elementos derivados de la restitución (curvas de nivel, matrices de correlación, líneas de estructura...) con diferentes niveles de calidad, que suelen conllevar la depuración manual interactiva del resultados (Villa, 2006). La calidad del MDE se hace crítica para la obtención de una ortofotografía precisa. Dado que la calidad geométrica de la ortofotografía depende de la del MDE, la opción idónea es la construcción del MDE de la zona a partir de imágenes estereoscópicas del mismo vuelo fotogramétrico, ya que en este caso se garantizaría un ajuste perfecto entre las imágenes y el MDE. La otra opción, menos indicada, es conseguir el MDE de fuentes externas para luego utilizarlo en la ortorrectificación (Cuartero y Felicísimo, 2003).
- ⇒ **Ortorrectificación:** una vez obtenido el MDE se realiza el proceso de ortorrectificación, consistente en la obtención de una serie de ecuaciones que permiten asignar un punto tridimensional terrestre a unas coordenadas X,Y,Z precisas en modelo la fotografía (tamaño del fotograma y distancia focal) y viceversa. Las primeras permiten generar el MDE y las segundas la ortofotografía, que no es más que el “relleno” píxel a píxel del MDE, asignando a cada coordenada X,Y,Z del mismo el valor radiométrico del píxel correspondiente a la fotografía que identifican las ecuaciones generadas.
- ⇒ **Mosaicado y compensación radiométrica:** la continuidad espacial de la ortofotografía resultante, al realizarse fotograma a fotograma, hace necesaria la unión de fotogramas correlativos. En este proceso de mosaicado se hace necesaria la consideración de la coherencia geométrica de los mismos, teóricamente asegurada, pero no así la radiométrica, dados los constantes cambios en las condiciones de toma (altura y azimuth solar, ángulo de incidencia, condiciones atmosféricas...), de calibración del sensor y de las características del propio terreno (humedad, vegetación, topografía...) entre los

mismos (Villa, 2006). Para ello, una vez mosaicados, se realiza un proceso de homogeneización denominado “compensación radiométrica” o “equilibrado radiométrico”, con el objetivo de conseguir una ortofotografía geométrica y radiométricamente continua. Este último proceso distorsiona la estructura radiométrica original de los fotogramas (de una banda o de todas las disponibles), cuyo formato de salida condicionará también la visualización de la imagen resultante (ver Tabla 3.1), usualmente ligada a formatos compresivos y destructivos (*jpeg*, *jpeg2000*, *mrsid*, etc.).



Figura 3.5. Proceso de generación de una ortofotografía digital.
Fuente: REDIAM, 2016.

3.1.1.3.- SERVICIO INTEROPERABLE

La generación y puesta en funcionamiento de los servicios web interoperables a través de estándares de visualización **Open Geospatial Consortium (OGC)** mediante **Web Map Service (WMS)** ha supuesto una magnífica vía para el acceso web a las ortofotografías digitales, si bien en su generación pueden aparecer alteraciones en la de resolución espacial o radiométricos derivados del formato de salida de la imagen WMS (*jpeg*, *png*...). Las ventajas que supone la disponibilidad de la información para todos los usuarios contrastan con el tiempo de respuesta del servidor para las peticiones de visualización requeridas. Con la aparición de los servicios web interoperables divididos en teselas (**Web Map Tile Service –WMTS-**) queda solucionado el problema de la velocidad

de respuesta, dado que el servidor carga exclusivamente las teselas o cuadrículas intervinientes en la extensión de la imagen requerida que, a diferencia de los WMS, ya están previamente generadas e indexadas. La facilidad y rapidez de acceso condicionan de forma notable la escala de visualización y sistema de referencia de coordenadas, ya que sólo son posibles los derivados de las estructuras teseladas generadas. La Tabla 3.1 muestra los productos generados por los vuelos fotogramétricos y las características y tratamientos aplicados que influyen en el resultado final de los mismos.

Tipo	Altura vuelo	Características cámara/sensor	Escaneado	Compensación radiométrica	Formato de salida ortofotografía	Formato visualización servicio interoperable	Escala de visualización y SRC
Vuelo fotogramétrico analógico (vfa)							
Vuelo fotogramétrico digital (vfd)							
Ortofotografía			vfd vfa				
Web Map Service (WMS)			vfd vfa				
Web Map Tile Service (WMTS)			vfd vfa				
	Variables asociadas al vuelo fotogramétrico			Variables asociadas a la ortofotografía		Variables asociadas al servicio interoperable	

Tabla 3.1. Características y tratamientos aplicados a cada producto de un vuelo fotogramétrico. Fuente: elaboración propia.

Se observa cómo de la totalidad de productos derivados, los que más fielmente reproducen las características radiométricas, espectrales y espaciales de la zona son, obviamente, las fotografías aéreas originales procedentes de los vuelos fotogramétricos (analógico y digitales) si se tiene disponibilidad de trabajar con ellas en un restituidor fotogramétrico, así como el acceso a los parámetros de orientación interna y externa (visión tridimensional, buena radiometría, acceso a la variable altimétrica...). Ante la imposibilidad de acceso al restituidor y ficheros de orientación de todos los vuelos de interés, **en esta Tesis** se ha optado por el uso de **ortofotografías** como soporte de la **fotointerpretación y digitalización de las líneas de costa**, priorizando la continuidad espacial y rigor geométrico.

3.1.2.- FUENTES PRINCIPALES: VUELOS Y ORTOFOTOGRAFÍAS UTILIZADOS

De los vuelos seleccionados para la Tesis es necesario destacar que la totalidad del proceso de fotointerpretación y digitalización se ha llevado a cabo a partir de ficheros digitales de ortofotografías obtenidas de los vuelos fotogramétricos realizados para las distintas fechas de estudio. No obstante, los servicios *WMS* de las mismas se han utilizado para ser consumidos por el geovisor web y, de forma puntual, se han utilizado los fotogramas originales para:

- ⇒ obtener las fechas precisas de vuelo (fotogramas analógicos o ficheros de centroides para fotogramas digitales),
- ⇒ contrastar las zonas donde la calidad visual resultante del proceso de compensación radiométrica de la ortofotografía dificulta la fotointerpretación y
- ⇒ cubrir tramos donde deficiencias geométricas de la ortofoto (esencialmente ortofotografías históricas) ha obligado a la georreferenciación manual.

Los vuelos fotogramétricos utilizados para el levantamiento de líneas de costa y las características de sus productos derivados (fotogramas, ortofotografías y *WMS*) son los siguientes (ver Tabla 3.2):

- ⇒ **Vuelo americano 1956-1957:** realizado mediante la colaboración del Ejército del Aire de España y la Fuerza Aérea de Estados Unidos, consta de un vuelo fotogramétrico a escala 1:33.000. Los productos resultantes utilizados son los siguientes:
 - Los **fotogramas originales analógicos**, escaneados para su uso en formato digital a una resolución de 21 μm . (obteniéndose una resolución digital de 0,69 m.), han sido utilizados para la obtención de metadatos (fecha de vuelo), así como para la georreferenciación de determinados sectores donde la calidad geométrica de la ortofotografía impide el correcto levantamiento de datos. Los fotogramas obtenidos indican una clara dicotomía entre las fechas estivales, concentradas exclusivamente en el sector occidental de Huelva (hasta Punta Umbría) y costa oriental almeriense, e invernales, predominantes en el ámbito de estudio restante desde Mazagón hasta Cabo de Gata (ver Figura 3.6).

- El **fichero de la ortofotografía** resultante posee 1 m. de resolución espacial. El formato de salida presentado es de carácter compresivo con pérdida (*mrsid*), pudiendo afectar a la calidad final de la imagen. Se observan zonas afectadas por deformaciones geométricas de diversa consideración, para la corrección de las cuales se ha procedido a la georreferenciación manual mediante puntos de control (ver apartado 3.2.4.1). Las zonas afectadas por este proceso corresponden al núcleo urbano de Cádiz, desembocadura del río Palmones (Algeciras), Punta de Calaburras y sector previo (municipios de Mijas y Marbella), frente litoral de Torremolinos y Málaga, delta del Guadalfeo (municipios de Salobreña y Motril), frente litoral de Carboneras, La Garrucha y sector acantilado de Cuevas de Almanzora, registrándose un total de 17 fotogramas georreferenciados correspondientes a casi 133 Km. de costa. De igual modo, se siguen observando deficiencias geométricas, cuya corrección mediante el apoyo visual de sus respectivos fotogramas se ve imposibilitada por la ausencia de información original o por la presencia de los mismos errores en los fotogramas escaneados. Son el caso del sector central de Doñana (Almonte) y sector acantilado de Tarifa, respectivamente, sumando un total de 6 Km. de costa excluidos. Las zonas con ausencia de datos, dada la presencia de enclaves militares de valor estratégico (Punta Camarinal –Tarifa-) y territorios no autónomos de soberanía extranjera (Gibraltar), de igual modo han sido excluidas, sumando al anterior un total de 15,5 Km. de costa (ver Figura 3.7). El fichero acusa problemas radiométricos generalizados, agravados en zonas de alta reflectividad correspondientes a extensos ámbitos arenosos litorales no consolidados (costa de Huelva, flechas litorales -El Rompido, Sancti Petri, etc.- y cuerpos dunares de gran extensión –Bolonia, Valdevaqueros, Punta de Entinas, etc.-).
- El servicio interoperable, disponible mediante **WMS**, posee una resolución similar a la ortofotografía. Se sirve simultáneamente junto con información referente a la fecha de toma de datos y distribución de hojas 1:10.000, siendo utilizados para la difusión bien a través de su carga y consulta en cualquier SIG libre o propietario o bien para alimentar a geovisores web. Al ser un producto derivado de la ortofotografía, la

calidad y características visuales del servicio interoperable están íntimamente ligadas a las propias de la misma.

⇒ **Vuelo IRYDA 1977-1983:** corresponde al Vuelo Fotogramétrico Nacional Interministerial (resultado de la colaboración entre el Instituto Geográfico Nacional y los Ministerios de Defensa, Fomento, Hacienda y Agricultura). Con una escala de vuelo de 1:18.000, conforma una fecha de estudio estratégica, a caballo entre el vuelo americano de 1956 y los vuelos actuales iniciados a finales de la década de 1990. Los productos derivados son los siguientes:

- Los **fotogramas originales analógicos** han sido escaneados para su uso en formato digital a una resolución de 25 μm . (obteniéndose una resolución digital de 0,45 m.). Dado el escaso contraste de los bordes de los mismos, se han obtenido los metadatos (fechas de vuelo) mediante consulta directa al Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). Los fotogramas muestran pequeñas discordancias temporales a lo largo del área de estudio, obtenidos en su mayoría en época estival (verano de 1977) como así se muestran los tramos correspondientes al sector occidental del área de estudio (río Guadiana-Punta Candor), sector central de la provincia gaditana (Cabo Roche-Punta Guadalmesí) y la amplia mayoría de la vertiente mediterránea (Punta de la Chullera-Cala Cerrada). El perfil de transición mostrado en estas zonas guarda especial parecido con el descrito en el tramo Punta Candor-Cabo Roche (volado en verano de 1978), suponiendo la cercanía de temporales a las fechas de vuelo. El área de estudio se completa con el tramo correspondiente al extremo suroriental de la provincia gaditana (Punta Guadalmesí-Punta de la Chullera), volado en invierno de 1979 y mostrando en muchas playas un perfil disipativo (ver Figura 3.6).
- El **fichero de la ortofotografía** resultante posee resolución espacial de 0,5 m. El formato de salida ejerce compresión con pérdida (*jpeg2000*). Pese a observarse importantes mejoras en la geometría del mismo, se identifican zonas con ausencia de datos, cuyas causas coinciden con la fuente anterior, si bien la presencia de las mismas se hace más notable. Las zonas excluidas por falta de información corresponden con la Base Naval de Rota y núcleo de Torregorda (Cádiz), enclaves de Punta Camarinal, Punta Paloma, Punta Camorro y Cañada del Moral (Tarifa),

Punta de San García (Algeciras), extremo oriental de Marbella junto con Calahonda (Mijas) y Punta de Torrox. Sumando los territorios no autónomos de soberanía extranjera (Gibraltar) alcanzan los 41 Km. de costa excluidos. Se observan leves deformaciones geométricas en el sector acantilado de la Cueva del Agua (Gualchos), afectando a 0,5 Km. de costa (ver Figura 3.7).

- El servicio interoperable, disponible mediante **WMS**, posee una resolución similar al fichero de la ortofotografía. Se sirve simultáneamente junto con información referente a la fecha de toma de datos y distribución de hojas 1:10.000, siendo utilizados para la difusión bien a través de su carga y consulta en cualquier SIG libre o propietario o bien para alimentar a geovisores web. Las características y calidad visual del servicio viene heredado de las propias de la ortofotografía.

⇒ **Vuelo pancromático 2001-2003**: fue realizado por el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA) en convenio con las actuales Consejerías de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural y Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Se trata de un vuelo fotogramétrico analógico realizado a escala 1:20.000, a partir del cual se han obtenido fotogramas pancromáticos para toda Andalucía. Los productos obtenidos son los siguientes:

- Los **fotogramas originales analógicos** han sido escaneados para su uso en formato digital a una resolución de 15 μm . (obteniéndose una resolución digital de 0,30 m.). Los metadatos correspondientes a las fechas de vuelo proceden de la información de los servicios interoperables contenidos en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) y en la Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía (IDEA). La distribución de las fechas de vuelo muestran una clara alternancia entre estaciones invernales y estivales, generando incompatibilidades en la visualización de las playas y la fotointerpretación de los *proxies* (sobre todo el *high water line* –ver apartado 3.2.1-). La distribución muestra un predominio de fotografías tomadas en época estival interanual, extendiéndose, a grandes rasgos, desde el núcleo de Matalascañas (Almonte) hasta Cabo Roche (Conil de la Frontera), desde Punta de la Chullera (Manilva) hasta Punta Piedra del Moro (El Ejido), desde Punta El Puntazo (Enix) hasta el Puntazo de Piedra Negra (Níjar) y desde la Punta del Santo (Carboneras) hasta el límite oriental de la zona

de estudio. Los sectores alternantes corresponden al extremo occidental de la costa de Huelva, mitad meridional de la costa gaditana, Campo de Dalías y sección central de la costa oriental almeriense, fotografiados en época invernal (ver Figura 3.6).

- Con una resolución espacial de 0,5 m., se confirma como la primera **ortofotografía** actual a ese nivel de detalle. El formato de salida es, al igual que el Vuelo Americano, de compresión con pérdida (*mrsid*). Pese a tener una geometría correcta, se identifican sectores con ausencia de datos por motivos militares y zonas externas a la soberanía estatal, correspondientes al Médalo del Loro (Almonte), Punta Candor (Rota), Punta Camarinal y Punta Canales (Tarifa) y Gibraltar, sumando un total de 13,5 Km. de costa excluidos. No se aprecian deformaciones geométricas ni radiométricas a destacar (ver Figura 3.7).
 - El **servicio WMS** resultante, de similar resolución espacial que la ortofotografía, se sirve simultáneamente con información referente a fechas de toma de datos y de distribución de cuadrículas a escala 1:10.000. Es utilizado para la difusión bien a través de su carga y consulta en cualquier SIG libre o propietario o bien para alimentar a geovisores web.
- ⇒ **Ortoimagen de satélite Quickbird-Ikonos 2005:** a diferencia del resto de fechas de estudio (utilizadas como períodos de referencia temporal para el cálculo de tasas de erosión), la ortοimagen *Quickbird-Ikonos* del litoral sólo se ha usado como apoyo visual a la digitalización de las líneas de costa en sectores acantilados de altura considerable, donde la altura de órbita (450 Km.) evita errores de abatimiento pese a la corrección previa en el proceso de ortorrectificación en la ortοimagen. Los productos generados son los siguientes:
- La **ortοimagen** ha sido generada a partir de imágenes de satélite *Quickbird* con una resolución espacial pancromática de 0,7 m. y multiespectral (RGB) de 2,8. Se garantiza una cobertura nubosa inferior al 5%, a partir del cual se han usado imágenes *Ikonos*. El MDE utilizado es el procedente de la ortofotografía digital pancromática del vuelo de 2001-2002 a escala 1:20.000 y el formato de salida es de carácter compresivo con pérdida (*mrsid*). No se detectan incompatibilidades de fechas ni zonas excluidas del análisis.

- El **servicio interoperable** posee la misma resolución espacial que la ortoimagen.
- ⇒ **Vuelo en color 2010-2011**: producto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), el vuelo fue realizado a escala 1:20.000. Los productos derivados del mismo son los siguientes:
- Los **fotogramas digitales**, tomados durante los períodos estivales de 2010 (cuadrantes meridionales excepto el sector occidental de Huelva) y 2011 (cuadrantes septentrionales y mitad occidental de Huelva), poseen una resolución espacial de 0,5 m. La resolución espectral abarca tanto bandas a color (RGB) como infrarrojo (IRC). Al igual que el vuelo anterior, se observa incompatibilidad de fechas de vuelo, no obstante, coinciden en el período estacional, minimizando la discordancia entre los perfiles morfodinámicos de las playas (ver Figura 3.6).
 - La **ortofotografía** resultante conserva las propiedades espaciales y espectrales de los fotogramas originales. El formato de salida es de carácter compresivo con pérdida (*jpeg2000*). Las zonas excluidas por falta de información se corresponden, en su mayoría, con las del vuelo de 2008-2009, a excepción del Médano del Loro, incluido en ésta última. La totalidad de zonas excluidas suman un total de 13,5 Km. de costa (ver Figura 3.7). No se observan problemas añadidos de índole geométrica ni radiométrica más allá de los generados durante el proceso de ortorrectificación.
 - El **servicio interoperable** conserva las características espaciales, radiométricas y espectrales de la ortofotografía, servida simultáneamente con información referente a la distribución de cuadrículas a escala 1:10.000. Se ha utilizado para la difusión bien a través de su carga y consulta en cualquier SIG libre o propietario o bien para alimentar a geovisores web.

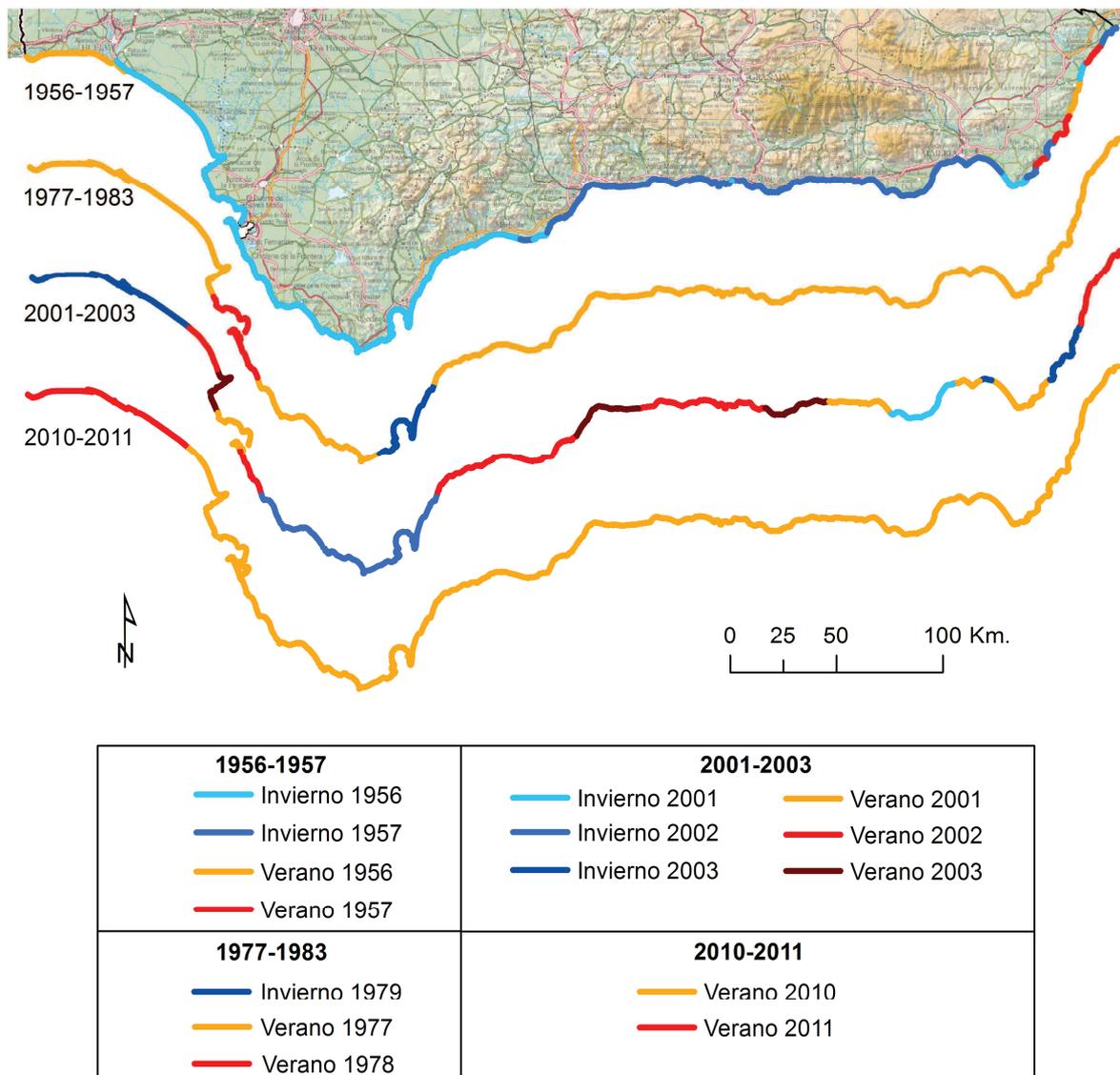


Figura 3.6. Caracterización de los tramos de línea de costa según las fechas de vuelo de las ortofotografías utilizadas.
Fuente: elaboración propia.

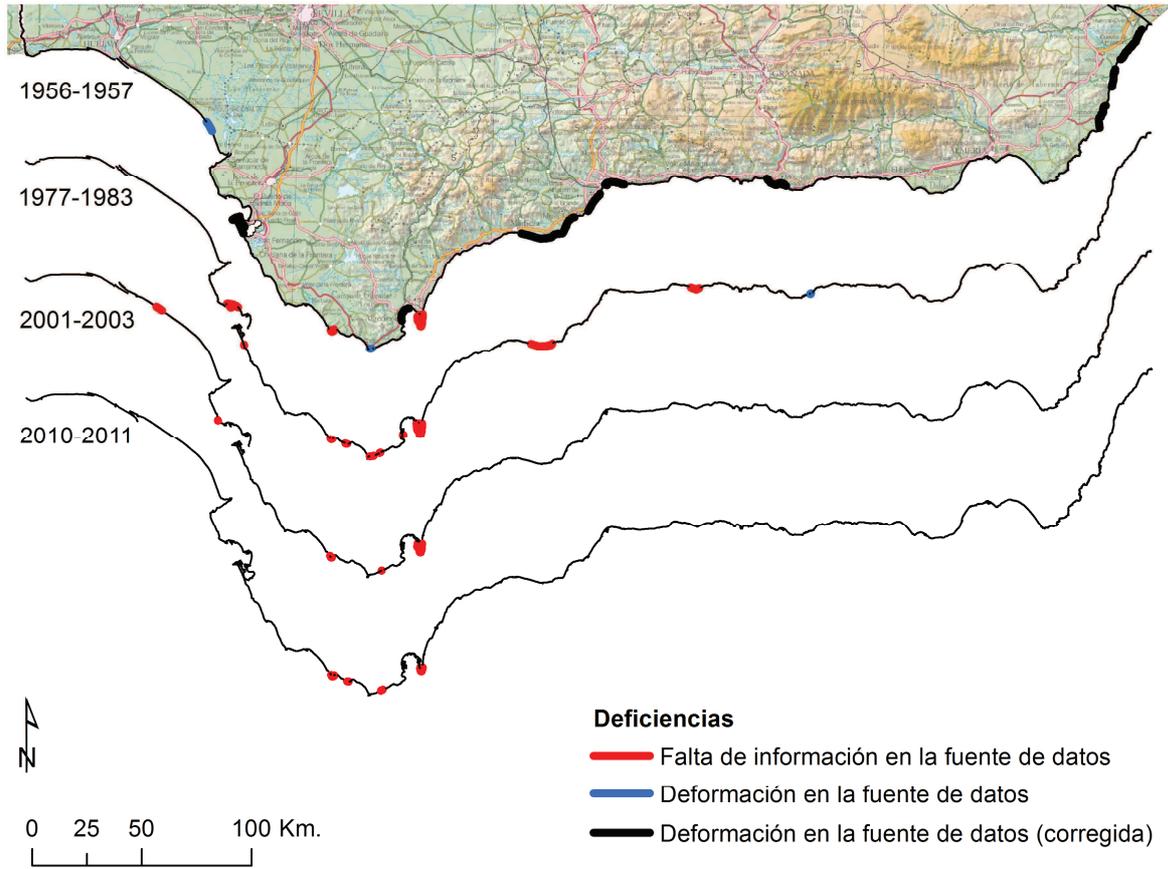


Figura 3.7. Tramos excluidos de las ortofotografías utilizadas para el levantamiento de líneas de costa.
Fuente: elaboración propia.

Nombre	Institución	Producto	Escala Vuelo	Pan / Color	Escaneado	Resolución espacial	Formato de salida
Vuelo americano 1956-1957	Ejército del Aire España / Fuerza aérea EEUU	Fotograma	1:33.000	Pancromático	Sí		
		Ortofotografía		Pancromático		1 metro	mrsid
		Servicio interoperable		Pancromático		1 metro	jpeg, gif, png8, png24, tiff, wbmp y svg + xml
Vuelo interministerial (IRYDA) 1977-1983	Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario	Fotograma	1:18.000	Pancromático	Sí		
		Ortofotografía		Pancromático		0,5 metros	jpeg2000
		Servicio interoperable		Pancromático		0,5 metros	jpeg, gif, png8, png24, tiff, wbmp y svg + xml
Vuelo fotogramétrico analógico de Andalucía 2001-2002	Junta de Andalucía	Fotograma	1:20.000	Pancromático	Sí		
		Ortofotografía		Pancromático		0,5 metros	mrsid
		Servicio interoperable		Pancromático		0,5 metros	jpeg, gif, png8, png24, tiff, wbmp y svg + xml
Imagen de satélite Quickbird-Ikonos del litoral de Andalucía 2005	Junta de Andalucía	Ortoimagen		Color + IRC		0,7 metros	mrsid
		Servicio interoperable		Color + IRC		0,7 metros	jpeg

Nombre	Institución	Producto	Escala Vuelo	Pan / Color	Escaneado	Resolución espacial	Formato de salida
Vuelo fotogramétrico en color de Andalucía 2010-2011	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)	Fotograma	1:20.000	Color + IRC	No	0,5 metros	
		Ortofotografía		Color + IRC		0,5 metros	jpeg2000
		Servicio interoperable		Color + IRC		0,5 metros	jpeg, gif, png8, png24, tiff, wbmp y svg + xml

Tabla 3.2. Vuelos fotogramétricos utilizados y características de sus productos derivados.
Fuente: elaboración propia.

3.1.3.- FUENTES COMPLEMENTARIAS

Junto a las ortofotografías de cada fecha de estudio, se ha hecho acopio de una serie de fuentes complementarias para la caracterización completa del frente costero andaluz.

⇒ **Mapas Topográficos históricos:** Los Mapas Topográficos históricos conforman la cartografía básica de cualquier territorio, siendo de vital importancia al describir con diversos niveles de detalle la realidad actual. Los importantes y continuos cambios que el territorio sufre en la actualidad suponen un constante esfuerzo de actualización por parte de las Administraciones Públicas, sobre todo de aquellas zonas más dinámicas, como son las capitales provinciales, las áreas metropolitanas y, sobre todo, el litoral. Actualmente, son servidos tanto como servicio interoperable como en formato digital mediante descarga directa. Los usados en el presente trabajo han sido la actualización de 2015 del Mapa Topográfico Nacional ráster a escala 1:25.000, muy útil como base toponímica oficial; y la edición histórica del Estado Mayor del Ejército Alemán (1940-1944), a escala 1:50.000, ideal para la visualización de la evolución histórica de las zonas más conflictivas y de los puntos calientes (*hot spots*) del ámbito de estudio (ver Figura 3.8).

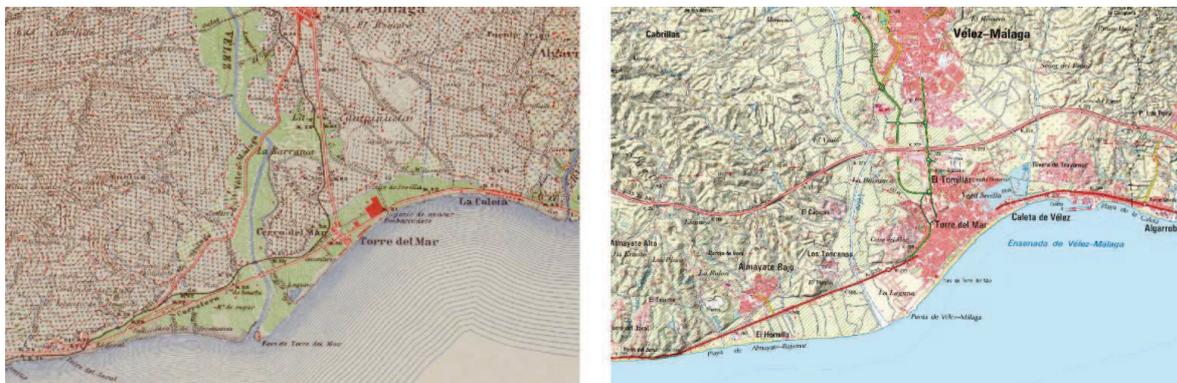


Figura 3.8. Detalle del delta del Río Vélez (Vélez Málaga).
A la izquierda: Mapa Topográfico del Estado Mayor del Ejército Alemán (1940-1944).
A la derecha: Mapa Topográfico Nacional ráster (actualización de 2015).
Fuente: Elaboración propia

⇒ **Mapa Geológico Continuo de España:** se sirve mediante servicio interoperable (WMS) por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), como resultado de la unión de los múltiples mapas geológicos de la Serie Magna a escala 1:50.000. A la información geológica se le unen atributos

alfanuméricos asociados de gran interés (ver Figura 3.9). Es de gran utilidad para identificar tipologías y litologías de unidades presentes en el litoral (acantilados, plataformas, terrazas...).

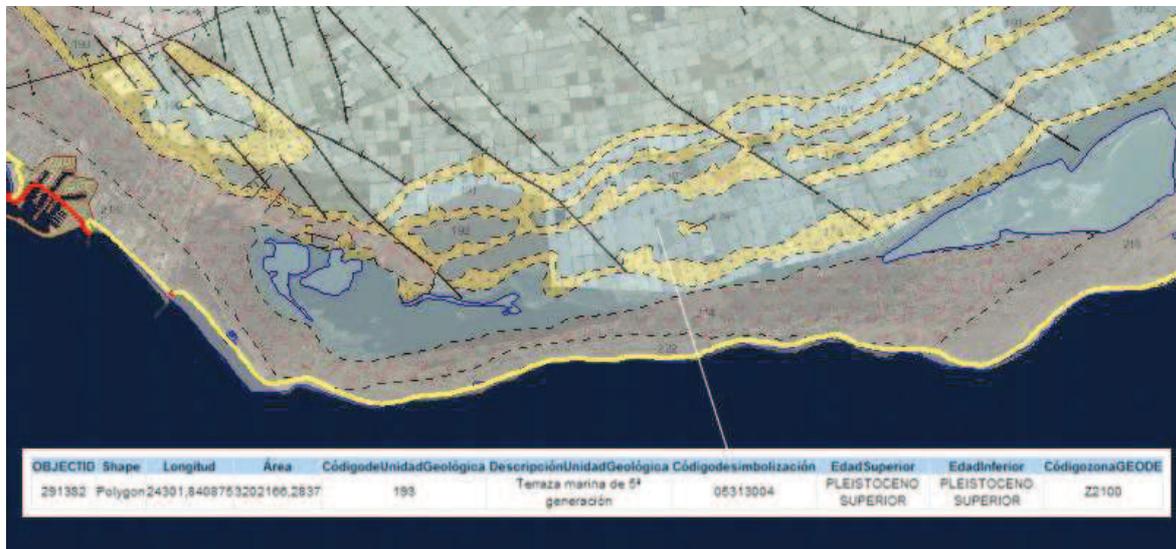


Figura 3.9. Ejemplo de atributos alfanuméricos asociados a cada unidad geológica del Mapa Geológico Continuo de España en el Campo de Dalías (El Ejido, Almería).

Fuente: Elaboración propia

⇒ **Aeroguías:** fueron originalmente editadas en soporte físico en 1998 por el actual Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, encontrándose actualmente descatalogadas. El material gráfico, compuesto por fotografías aéreas oblicuas y dividido en dos sectores (occidental –Huelva y Cádiz- y oriental –Málaga, Granada y Almería-), fue concebido para un uso fundamentalmente turístico, al incorporar en su cartografía mapa de carreteras, historia, arte, excursionismo, hostelería y fiestas populares. Se trata, por tanto, de una descripción detallada de las playas, servicios y accesos de los que dispone el litoral, además de una precisa información toponímica (ver Figura 3.10).

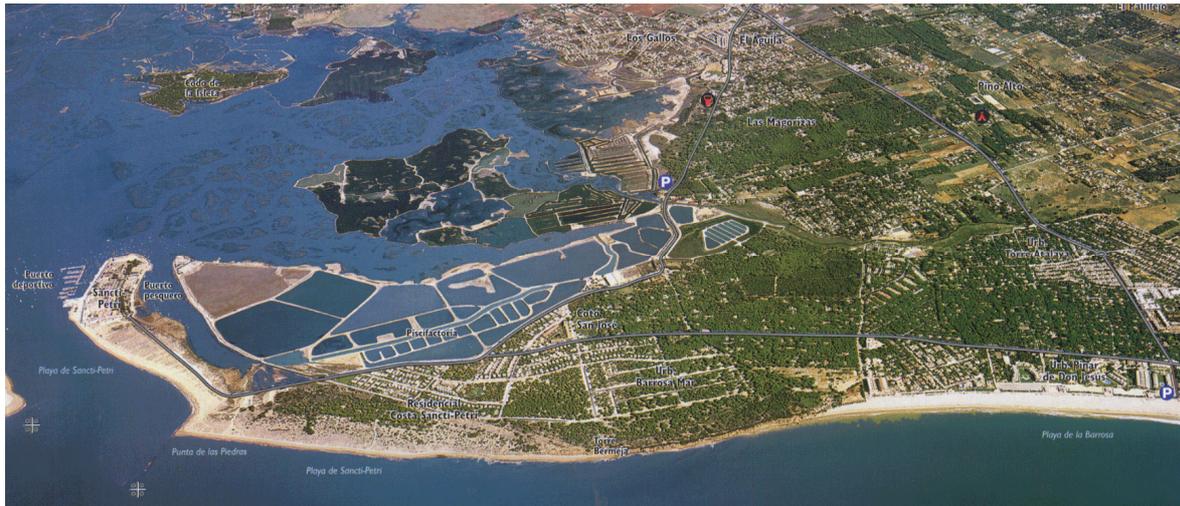


Figura 3.10. Información multitemática asociada al tramo de Sancti Petri (Chiclana de la Frontera, Cádiz).

Fuente: Aeroguía del Litoral de Andalucía Occidental.

- ⇒ **Fotografías aéreas oblicuas:** son el material gráfico resultante de un vuelo a baja altura realizado por la Dirección General de Costas en 2001. Suponen un recurso útil cuando se precisa información visual a gran escala de detalle (ver Figura 3.11).



Figura 3.11. Fotografía aérea oblicua del Peñón de Salobreña y Playa de La Charca (Salobreña, Granada).

Fuente: Dirección General de Costas (MAPAMA).

- ⇒ **Fotografías *in situ* del litoral:** realizadas en 2001 por el Grupo de Investigación como soporte gráfico para el Sistema de Información Geográfica del Litoral Andaluz –SIGLA– (ver Figura 3.12).



Figura 3.12. Fotografía a pie de campo de una playa de “bolos” sobre formaciones flyshoides en Punta Guadalmesí (Tarifa, Cádiz).
Fuente: Grupo de Investigación RNM-177.

3.2.- CRITERIOS DE FOTOINTERPRETACIÓN Y LEVANTAMIENTO DE DATOS

3.2.1.- CRITERIOS DE FOTOINTERPRETACIÓN

La definición previa del criterio de fotointerpretación de las líneas de costa (***shoreline proxy***) se considera fundamental a la hora de obtener tasas de erosión, condicionando de manera decisiva la metodología desarrollada y los resultados obtenidos.

La elección del criterio idóneo de fotointerpretación así como la evaluación de las técnicas y métodos más adecuados para minimizar errores de posicionamiento geométrico e interpretación con el uso de diversas fuentes de datos es una temática de interés creciente entre miembros afines de la comunidad científica (Crowell y Leatherman, 1999; Ojeda, 2000; Fletcher et al., 2003; Boak y Turner, 2005; Braga et al., 2013; Del Río y Gracia, 2013; Fernández et al., 2015). Tal y como se describieron en el capítulo 2 de la presente Tesis, los indicadores (*proxies*) de la línea de costa pueden responder a un criterio puramente altimétrico, generalmente asociado al régimen mareal (*tidal datum-based proxy*) o a la identificación de objetos o características (*feature-based proxy*) fácilmente reconocibles en campo, mapas u ortofotografías (Ojeda, 2015). Se distingue un tercer tipo de criterio, analizado en la literatura reciente, basado en el uso de técnicas de procesamiento de imágenes digitales donde se identifican objetos o características por técnicas de clasificación no necesariamente detectables por el ojo humano (Aarninkhof et al., 2001, 2003; Boak y Turner, 2005; Pardo et al., 2012). El uso de ortofotografías y documentos de referencia visuales como apoyo a la fotointerpretación implica, en nuestro caso, la imposibilidad de utilizar indicadores basados en la altimetría, por lo que solo es posible la utilización de indicadores del tipo ***feature-based proxy***.

En ese aspecto, hay multitud de objetos o características reconocibles en campo o en la ortofotografía que pueden servir como indicador de posición de la línea de costa, en función a las características de la misma (ver Figura 3.13).

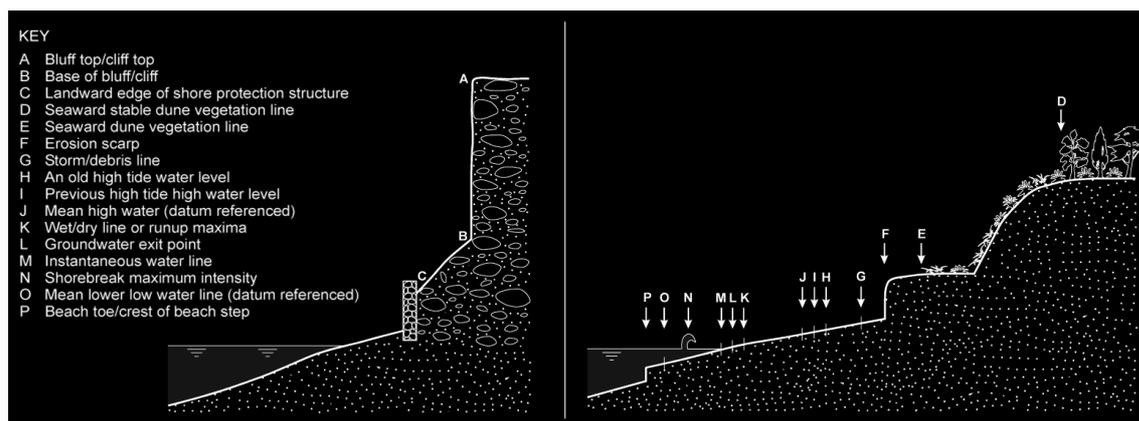


Figura 3.13. Tipos de indicador de posición de línea de costa.
Fuente: modificado de Boak y Turner (2005).

La erosión, como proceso dinámico a diferentes escalas espacio-temporales, necesita de un criterio homogéneo y estable, minimizando su dificultad de identificación por factores externos (marea, clima marítimo, etc.) y que permita una comparación fiable de los resultados obtenidos para los diferentes períodos. Los indicadores más comúnmente aceptados para el estudio de la evolución costera son los siguientes (ver Figura 3.14):

- ⇒ **Límite de agua instantáneo:** se trata del criterio más efímero y, por lo tanto, el menos estable y fiable de los descritos, ya que depende directamente de las condiciones puntuales de la marea y características del oleaje en cada fotograma.
- ⇒ **Límite *high water line (HWL)*:** el límite lo marca la zona de *swash* de la playa media, hasta donde llega el influjo máximo de la lámina de agua en condiciones ordinarias de pleamar, reconocible mediante la marca húmeda o *wet/dry line* (Anders y Byrnes, 1991). Dado que siempre se encontrará inserto en el perfil transversal de la playa, caracterizado por su continuo ajuste morfosedimentario debido a las condiciones del mar, las mareas y el oleaje (Crowell et al., 1991; Pajak y Leatherman, 2002; Moore et al., 2006; Ruggiero y List, 2009; Ojeda, 2015), plantea problemas de concordancia morfodinámica entre los perfiles transversales correspondientes a fotogramas de distintos períodos.
- ⇒ **Límite *backshore/foredune*:** establece el límite entre la playa alta (seca) y la duna litoral asociada. Según las características del tramo litoral, el límite descrito puede verse influenciado por la presencia de sectores con material consolidado o elementos antrópicos. En estos casos, el límite viene marcado

por la **base del acantilado** (con o sin presencia de material detrítico en la misma) o el **contacto directo con la infraestructura**, respectivamente. Es considerado por muchos autores el criterio más estable a largo plazo, ya que viene marcado por el máximo nivel alcanzado por la lámina de agua durante eventos meteorológicos y/o astronómicos excepcionales (Ojeda, 2000; Del Río, 2007; Prieto, 2012), quedando aislado de los efectos perturbadores de los continuos cambios del perfil transversal debidos a su inmediata respuesta a la marea y al oleaje (Ojeda, 2015).



Figura 3.14. Criterios de digitalización de la línea de costa.

1: límite de *agua instantáneo*. 2: límite *high water line –HWL–*. 3: límite *backshore-foredune*.

Fuente: elaboración propia.

Para esta Tesis Doctoral, la digitalización de la línea de costa se ha llevado a cabo a partir de la fotointerpretación de **2 criterios o proxies**:

- ⇒ Límite interno de la playa (***backshore/foredune***): dada la mayor estabilidad de este *proxy*, será el utilizado para el cálculo y análisis de las tasas.
- ⇒ Límite externo de la playa seca, el ***HWL***: su uso se restringe a la delimitación del límite inferior de la playa alta. Debido a su ubicación dentro del perfil activo de la playa, se han excluido la valoración e interpretación de los resultados de las tasas en este texto, aunque no su cálculo, integrado en el geovisor web para su consulta.

Una vez seleccionado el *proxy* o indicador a utilizar, la plasmación geométrica del proceso de digitalización puede ser abordada de diferentes formas. En el caso de una aplicación estricta, se traza el contacto preciso entre la playa seca y la duna litoral, base acantilada o infraestructura, generándose una línea de costa que, en algunos sectores, puede ser muy sinuosa por la presencia de entrantes ligados a la acción antrópica (pasos antrópicos) o a eventos extremos y temporales (*overwash* en dunas). En este caso, se entiende que **los procesos erosivos tienden a homogeneizarse en escalas espacio-temporales medias/largas como las utilizadas en esta Tesis, respondiendo con un**

retroceso gradual y lineal de la línea de costa. Teniendo en cuenta esta afirmación, el proceso de digitalización empleado ha sido una **línea suavizada y generalizada** a lo largo de toda la costa, excluyendo entrantes bruscos ligados a los procesos antrópicos o a la concentración energética del oleaje antes comentados, que restan fiabilidad tanto a los resultados a largo plazo como a las posibles proyecciones futuras de los mismos (ver Figura 3.15). Este tipo de digitalización para la plasmación geométrica es más evidente en el *proxy* correspondiente al contacto **backshore/foredune** (ver Figura 3.14).



Figura 3.15. Ejemplo de digitalización generalizada en entrantes costeros en Costa Ballena (Rota, Cádiz).
Fuente: elaboración propia.

3.2.2.- ESCALA DE DIGITALIZACIÓN

El siempre presente concepto de calidad final de los datos está estrictamente relacionado con la exactitud de la realidad representada (exactitud posicional). En este caso, la magnitud del error es inversamente proporcional a la escala de trabajo, de tal forma que un mismo error es mayor cuanto menor sea la escala de trabajo y viceversa (Vila y Varga, 2008).

No existe intervalo de exactitud globalmente aceptado, ya que está muy en consonancia con los objetivos específicos de cada trabajo de investigación y con la

precisión de las fuentes de datos disponibles. Es por ello que, dada la **resolución de la pantalla** utilizada para la digitalización (equivalente al tamaño del papel en fuentes analógicas), así como de las **ortofotografías** utilizadas (tamaño del píxel), se ha forzado la escala de trabajo idónea, siendo de **1:2.500** la escala de digitalización de las líneas de costa (a esta escala, el tamaño del píxel de la pantalla se corresponde con 0,6 m., un valor intermedio entre las resoluciones de las ortofotografías utilizadas, entre 0,5 y 1 m.).

3.2.3.- ERRORES GEOMÉTRICOS EN EL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN Y FOTOINTERPRETACIÓN

Tal y como se adelantaba en el Capítulo 2, todo proceso de obtención de tasas evolutivas costeras se encuentra alterado por errores de precisión y localización que han de ser asumidos tanto por el autor como por los usuarios finales. La fiabilidad de los resultados obtenidos depende de forma directa de las fuentes de información utilizadas y del método de cálculo adoptado (Foote y Huebner, 1995). Por ello, se hace imprescindible determinar la evaluación de un rango de incertidumbre que permita evaluar los resultados y obtener umbrales de significancia de los mismos (Del Río, 2007).

Las variables a tener en cuenta a la hora de estimar un umbral de incertidumbre de error del proceso de fotointerpretación y digitalización dependen de factores intrínsecos a las **fuentes** (tamaño de píxel, calidad radiométrica, fechas, etc.) y de los **fenómenos que afecten a la fotointerpretación del proxy utilizado** (marea, oleaje, pendiente de la playa...). En este caso, las particularidades de las fuentes de datos, el método de cálculo (posteriormente definido en el apartado 3.4.1.2) y el *proxy* adoptado para el cálculo de las tasas (*backshore/foredune*) en la presente Tesis hacen que se hayan tenido en cuenta **4 variables** que alteran la exactitud posicional de las líneas de costa. Este proxy, al ubicarse en el límite interior del perfil transversal de la playa, queda aislado del efecto de otras variables que son consideradas habitualmente, (rango mareal, pendiente de la playa, estación, etc.) cuando se utilizan *proxies* sensibles a las mismas:

- ⇒ **Resolución espacial de la fuente:** hace referencia al **tamaño de la rejilla** regular con valor codificado del que hacemos uso mediante la utilización de fuentes de datos ráster como es el caso de la ortofotografías. El tamaño de la unidad mínima de información (píxel) determina la escala de la imagen y, por tanto, su resolución (Bosque, 1992). En caso de utilización de datos escaneados, también entran en juego las características del material utilizado,

influyendo en la resolución final del producto (Catalão et al., 2002). La precisión obtenida es inversamente proporcional al tamaño del píxel. De este modo, según las fuentes utilizadas en el presente trabajo de investigación, **el error oscila entre 0,5 y 1 m.**, en función de la resolución espacial de las mismas.

- ⇒ **Escala:** la **precisión del operador** en el proceso de digitalización es una variable de difícil cuantificación, dado el enorme abanico de condicionantes que en él influyen, siendo muy importante la escala. Aplicado al ámbito digital, **la escala de trabajo está íntimamente relacionada con la resolución de la pantalla utilizada**. Dicha resolución (1680x1050 píxeles en nuestro caso) implica que, a **escala 1:2.500**, la extensión horizontal total de visualización corresponden a 1.110 m. sobre el terreno. Estas cifras reflejan que cada píxel de la pantalla equivale a 0,6 m. en la realidad. Tras varias pruebas del autor de este trabajo para representar un mismo elemento puntual claramente visible en una ortofotografía, se ha obtenido unas diferencias medias de 2,5 píxeles, por lo que para esta variable se ha adoptado un **error medio continuo de 1,5 m.**
- ⇒ **Criterio del fotointérprete:** las **condiciones o criterios subjetivos** de cada fotointérprete afectan directamente al levantamiento de datos y, por consiguiente, a los resultados obtenidos. Para la cuantificación de dicha variable se ha medido la distancia media entre diversas muestras de líneas de costa levantadas por varios fotointérpretes expertos en función de las casuísticas más frecuentes del *proxy* utilizado (límite del *backshore* con infraestructura/acantilado, con duna estable y con duna no consolidada), nítidamente reconocibles. **El error medio de las distintas muestras de líneas de costa, diferente según las características de las fuentes de datos, es de 1,25 m. para fuentes con resoluciones submétricas y de 3 para las métricas.**
- ⇒ **Georreferenciación:** sólo en los casos en los que, por deficiencias en las ortofotografías (ver apartado 3.2.4.1), se han utilizado fotografías corregidas geoméricamente mediante un proceso de georreferenciación (*tool/georeferencing* de ArcGis®), el error de este proceso se ha cuantificado, como es habitual (Morton et al., 2004), mediante el **error medio cuadrático (Root Mean Square-RMS)**. Éste expresa la desviación de la localización de un objeto respecto a su posición real, originada durante el proceso de georreferenciación manual de fotografías aéreas. Pese a no ser totalmente representativo de la exactitud posicional (Hughes et al., 2006), es una estimación generalmente

aceptada por la comunidad científica afín (Del Río, 2007). En este sentido, existen propuestas novedosas de corrección geométrica direccional que cuantifican el error posicional de los puntos de control en base a vectores orientados hacia la línea de costa objeto de estudio (Ojeda et al., 2015). En el caso de esta Tesis, la única fuente de datos con necesidad de georreferenciación adicional (ver apartado 3.2.4.1) es la ortofotografía procedente del Vuelo Americano de 1956-1957, generando **errores puntuales que oscilan entre los 2 y los 5,5 m.**

El cálculo del **error** en cada fecha de estudio, expresado **en metros**, suele resultar de la **raíz de la suma cuadrática** de las variables cuantificadas (Coyne et al., 1999; Del Río, 2007):

$$Error_{cuadrático} = \sqrt{Error_{resolución}^2 + Error_{escala}^2 + Error_{criterio}^2 + Error_{georreferenciación}^2}$$

Con el objetivo de conocer el error máximo posible, se ha calculado el **error potencial máximo** de cada fecha, igualmente expresado en **metros**. De este modo, el error potencial viene determinado por el simple **sumatorio** de las variables constantes utilizadas (resolución, escala y criterios del fotointérprete) a las que se le suma la variable procedente del proceso de georreferenciación, incluida exclusivamente en aquellos tramos donde se ha necesitado la georreferenciación manual de fotogramas mediante puntos de control.

$$Error_{potencial} = Error_{resolución} + Error_{escala} + Error_{criterio} + Error_{georreferenciación}$$

A continuación se detallan los errores cuadráticos y potenciales de las variables constantes de cada fecha calculados para el presente trabajo de investigación, sin añadir la variable procedente de la georreferenciación manual, aplicada puntualmente a tramos específicos que no aportan representatividad al conjunto global (ver Tabla 3.3).

Ortofotografía	Error resolución	Error escala	Error criterio	Error cuadrático (m.)	Error potencial (m.)
1956-1957	1	1,5	3	3,5	5,5
1977-1983	0,5	1,5	1,25	2	3,25
2001-2003	0,5	1,5	1,25	2	3,25
2010-2011	0,5	1,5	1,25	2	3,25

Tabla 3.3. Errores cuadráticos y potenciales de cada ortofotografía.
Fuente: elaboración propia.

El error por período, **expresado como tasa de cambio anual (metros/año)**, es calculado mediante la raíz de la suma cuadrática de ambos errores cuadráticos de cada fecha, dividido entre el tiempo transcurrido durante dicho período (Del Río, 2007):

$$Error_{cuadrático\ período} = \frac{\sqrt{Error_{cuadrático\ 1}^2 + Error_{cuadrático\ 2}^2}}{Tiempo}$$

En el caso del error potencial, igualmente **expresado como tasas de cambio anual (metros/año)**, resulta de la suma de ambos errores potenciales de cada fecha, dividido entre el tiempo transcurrido durante dicho período:

$$Error_{potencial\ período} = \frac{Error_{potencial\ 1} + Error_{potencial\ 2}}{Tiempo}$$

A continuación se detallan los errores cuadráticos y potenciales de las variables constantes de cada período de estudio, sin añadir la variable procedente de la georreferenciación manual (ver Tabla 3.4).

Período	Años por período (promedio zona de estudio)	Error cuadrático por período (m./año)	Error potencial por período (m./año)
1956-2011	53,16	0,08	0,16
1956-1977	19,91	0,20	0,44
1977-2001	24,58	0,12	0,26
1977-2011	32,25	0,09	0,20
2001-2011	8,58	0,33	0,76

Tabla 3.4. Errores cuadráticos y potenciales de cada período de estudio.
Fuente: elaboración propia.

Los intervalos de incertidumbre de error han sido calculados en función a las **características y necesidades específicas expuestas en la presente Tesis Doctoral**, por lo que **no deben ser interpretados de forma exhaustiva en contextos externos a la misma**. En este trabajo de investigación, **las tasas resultantes han sido comentadas exclusivamente según los errores potenciales de cada período de estudio**. Por ello, se ha incorporado al **geovisor web** una herramienta que permite aplicar a las tasas calculadas **cualquier otro valor de forma interactiva** por parte del usuario si lo considera necesario o si desea observar el efecto del nivel de restricción en la elección de los umbrales.

3.2.4- LEVANTAMIENTO DE DATOS

3.2.4.1.- MARCO DE TRABAJO Y CONTROL DE CALIDAD INICIAL

El marco de trabajo elegido para el proceso de levantamiento *ex novo* de las líneas de costa y posterior cálculo de tasas de erosión es el software propietario ArcGis[®]10.3, dado su interfaz de usuario amigable y la facilidad del proceso digitalizador en el mismo. Al igual que el modelo de datos previamente definido, todo el proceso de fotointerpretación y digitalización se ha realizado en un entorno de base de datos espaciales de ESRI[®] (*geodatabases*), posibilitando un control de calidad final integral de los datos (ver apartado 3.2.4.3).

El sistema geodésico de referencia espacial utilizado, en base al Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio³², es el *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), proyectado mediante el sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM) para el huso 30 Norte. El uso de fuentes de datos anteriores a la entrada en vigor del cambio de sistema de referencia espacial (georreferenciadas en *European Datum 1950 – ED50-*) hace necesaria la transformación previa del sistema de coordenadas siguiendo varios modelos. Destacan el de semejanza espacial de 7 parámetros, el de superficies de mínima curvatura (rejillas) y el polinomial (González et al., 2004). No obstante, pese a la fiabilidad de la precisión de los modelos, existe un error mínimo que debe ser asumido por el digitalizador.

³²Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. Disposición 15822 del Boletín Oficial del Estado, nº 207. Miércoles, 29 de agosto de 2007. Páginas 35986-35989.

Las fuentes de datos, como elemento básico de referencia, también han sido sometidas a un exhaustivo control de calidad previo como pudo apreciarse en el apartado 3.1.2. A los mínimos errores de posicionamiento procedentes de la transformación de datum (al utilizar la transformación de la rejilla publicada por el IGN) hay que unirle los errores propios del proceso de ortorrectificación, los cuales han derivado en deformaciones geométricas puntuales, sobre todo en fuentes de datos históricas. Para su corrección se ha procedido a la **georreferenciación manual mediante puntos de control de 17 fotogramas del Vuelo Americano de 1956** para la totalidad del área de estudio (ver Figura 3.16), a los que se ha aplicado una transformación polinomial de primer grado (*affine*).

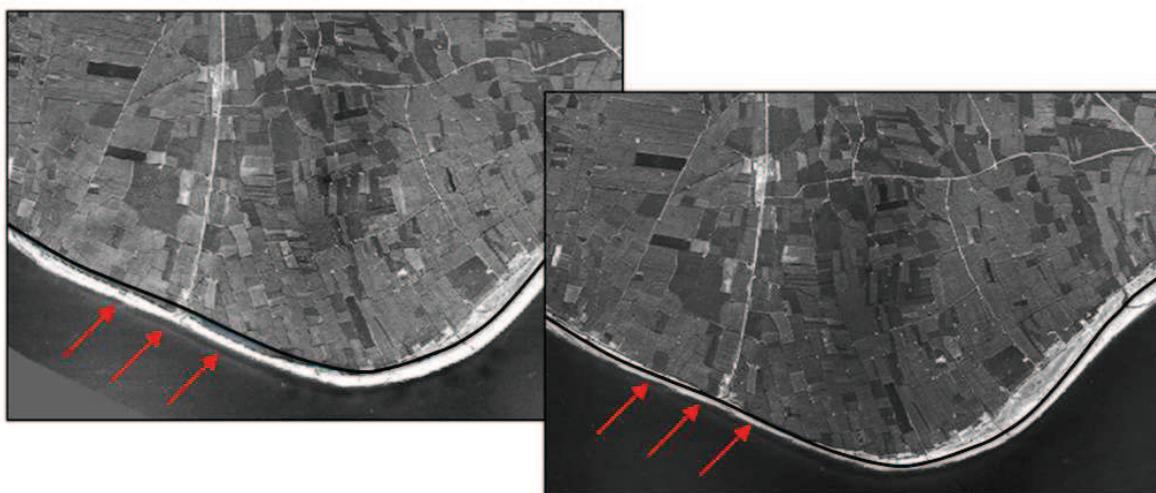


Figura 3.16. Corrección de deformación geométrica en un fotograma de 1956 correspondiente al delta del Río Guadalfeo (municipios de Salobreña y Motril, Granada).
Fuente: modificado de Prieto (2012).

La definición del modelo de datos y la corrección previa de las fuentes de datos suponen un control de calidad integral de la información, asegurando un marco de trabajo idóneo y un repositorio de datos fiables sobre los que proceder al levantamiento *ex novo* de las líneas de costa que intervienen en los análisis temporales de estudio.

3.2.4.2.- DIGITALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE COSTA

Una vez elegido el criterio de línea de costa a seguir se procede a la **digitalización de 2 líneas de costa** para cada fecha de estudio: una con el criterio *backshore-foredune* y otra en base a la *HWL*. En este proceso, una vez identificado el proxy, en lugar de proceder a la digitalización directa se ha optado metodológicamente por un proceso de **desactualización de la línea de costa de 2009** elaborada por el Grupo de Investigación.

Este proceso parte de una línea de costa original correspondiente al vuelo digital 2008-2009, cuya geometría ha sido trasladada a su posición correspondiente para las fechas de estudio restantes. De esta manera, se garantiza la **permanencia total de la información alfanumérica asociada**, fruto del modelo de datos, desarrollado ampliamente en el apartado 3.3. Durante el proceso de digitalización hay que destacar 2 aspectos relevantes, realizados de forma paralela: el tratamiento de la componente geométrica y de la componente alfanumérica.

TRATAMIENTO DE LA COMPONENTE GEOMÉTRICA

En función a la naturaleza del objeto representado, se han utilizado dos tipos de líneas (ver Figura 3.17):

- ⇒ Línea recta: caracteriza los tramos de línea de costa con bordes claramente definidos, correspondientes a las infraestructuras costeras, tales como puertos, embarcaderos o espigones.
- ⇒ Línea tangente: definida como un arco circular tangente al segmento previamente representado, caracteriza los tramos de línea de costa de transición suave y bordes suavizados, propios de sectores no antropizados, tales como los contactos naturales *backshore-foredune*, *HWL* o base de sectores acantilados.



Figura 3.17. Izquierda: digitalización con línea recta en elementos antrópicos. Derecha: digitalización con línea tangente en contactos naturales.

Fuente: elaboración propia.

TRATAMIENTO DE LA COMPONENTE ALFANUMÉRICA

El levantamiento de la componente geométrica (comentada en el anterior apartado) ha supuesto un ejercicio altamente costoso en tiempo, por lo que **la estructura alfanumérica de la base de datos ha sido completada de forma paralela a la digitalización** de las líneas de costa de todas las fechas. No obstante, dicha labor de almacenamiento alfanumérico sólo se ha realizado **actualizando algunas tablas clave del modelo de datos original para la interpretación y caracterización de cada línea de costa en cada fecha, conservando las tablas restantes** (ver apartado 3.3 correspondiente al modelo de datos).

Cada campo de la base de datos ha sido completado mediante el uso de **“dominios”** (disponible en entornos que utilicen *geodatabases* ESRI®), definidos como catálogos codificados de opciones limitadas (ver Figura 3.18). Estos dominios, materializados en tablas alfanuméricas de valores codificados, son la base del modelo de datos creado, normalizando y atomizando la información, suponiendo el almacenamiento masivo óptimo de los datos disponibles (Villar y Ojeda, 2012). Dichos dominios han sido generados de forma individual para cada campo, facilitando al fotointérprete y digitalizador el levantamiento de información temática y suponiendo un control de calidad previo a los errores potenciales del proceso de almacenamiento al evitar errores de omisión (ausencia de datos) y comisión (descripción equivocada), desarrollados en el apartado 3.2.4.3 del presente capítulo.

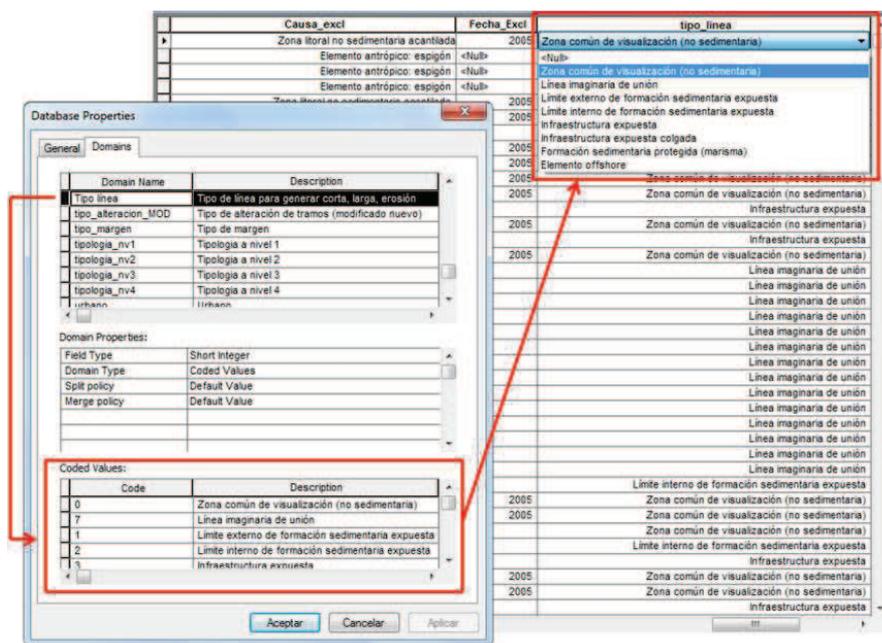


Figura 3.18. Uso de dominios individuales para cada campo de la base de datos de línea de costa. Fuente: elaboración propia.

3.2.4.3.- CONTROL DE CALIDAD FINAL

El control de calidad final es un paso necesario en todo proceso metodológico, el cual otorga seguridad a los datos generados a la vez que fiabilidad a los resultados derivados de los mismos. En el presente trabajo de investigación se ha aplicado un control de calidad integral a la componente geométrica y alfanumérica, descrito a continuación.

COMPONENTE GEOMÉTRICA

El control de calidad final a la componente geométrica hace referencia al **control topológico** de las líneas de costa. Un adecuado control topológico evita errores geométricos de inclusión, continuidad y solapamiento en cada uno de los elementos geométricos que participan en un mismo análisis. El carácter lineal de las entidades implica una serie de reglas topológicas específicas, centradas en la corrección de errores específicos según la naturaleza de las mismas. Las dos reglas aplicadas para el control topológico son (ver Figura 3.19):

- ⇒ Nodos sueltos (*dangles*): con su corrección se garantiza la continuidad espacial de todos los tramos pertenecientes a una misma línea de costa, aunque ella se encuentre dividida en tramos independientes.
- ⇒ Solapamientos (*overlaps*): con su corrección se evita que un mismo tramo de línea de costa o sector de éste sea recorrido por más de una línea simultáneamente.

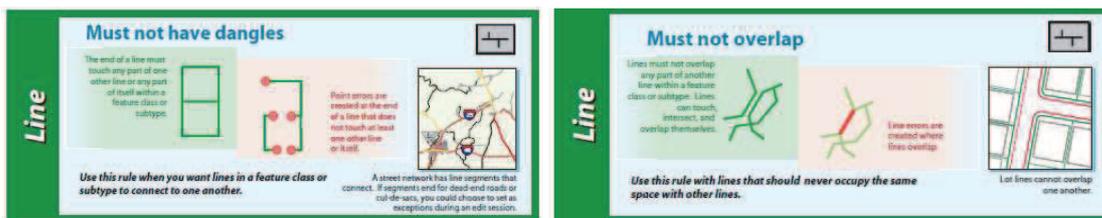


Figura 3.19. Reglas topológicas aplicadas en el control de calidad final de los datos.

Fuente: ArcGis®

COMPONENTE ALFANUMÉRICA

El control de calidad final de la componente alfanumérica ha consistido, básicamente, en la realización de 2 procedimientos:

- ⇒ Verificación de tablas de cumplimentación obligatoria para evitar errores de omisión de datos (campos en blanco).

⇒ Chequeo arbitrario de concordancia lógica en la codificación de tramos costeros (ver Figura 3.20), con el fin de detectar incompatibilidades en el proceso de cumplimentación de tablas (por ejemplo, la existencia de un tramo de costa acantilada en el cuarto nivel jerárquico implica la misma tipología en los niveles jerárquicos anteriores –ver apartado 3.3 correspondiente al modelo de datos-).

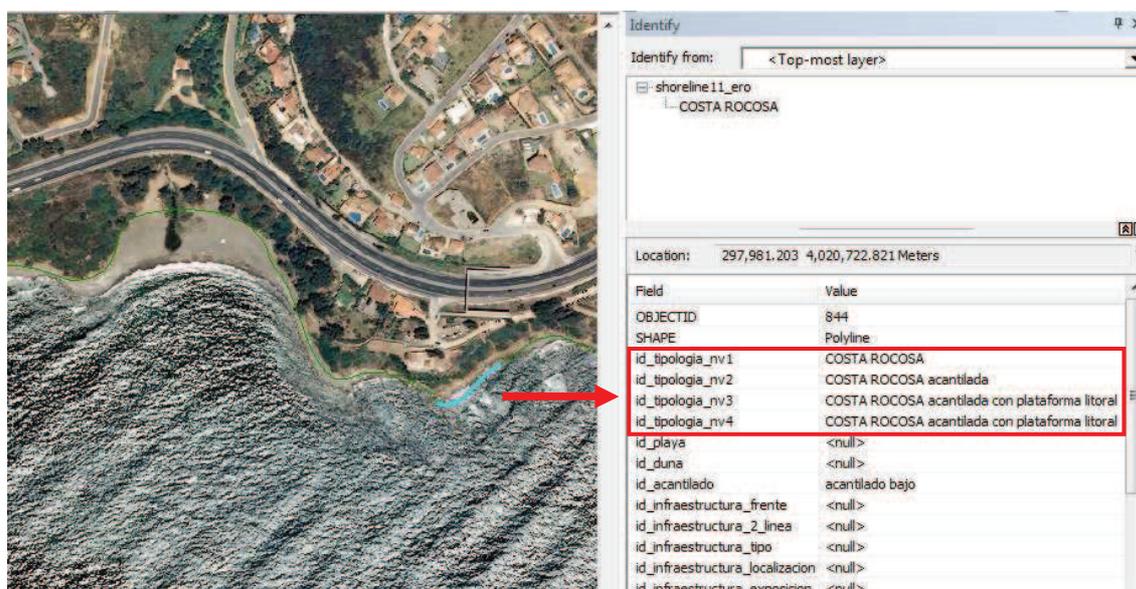


Figura 3.20. Verificación de tablas de cumplimentación obligatoria y chequeo de concordancia lógica para un tramo costero acantilado.

Fuente: elaboración propia.

3.3.- MODELO DE DATOS

El modelo de datos utilizado en esta Tesis **parte inicialmente** del ya desarrollado por el Grupo de Investigación RNM-177 al que pertenece el autor, en el marco de proyectos de excelencia nacionales, autonómicos y contratos con la Administración, en este último caso, para ser incluido en el Subsistema Litoral y Medio Marino (SSLMM) de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Ha sido presentado en diversas publicaciones a congresos y jornadas de alcance nacional para su difusión (Frieyro et al., 2010; Ojeda et al., 2010, 2013; Díaz et al., 2013; Fernández et al., 2015). Originalmente desarrollados en una base de datos ESRI para la **línea de costa de 2009**, los datos han sido implementados en un modelo de datos normalizado, utilizando un gestor de base de datos más potente y de código abierto (**PostgreSQL/PostGIS**).

La normalización de los datos almacenados permite maximizar las capacidades analíticas de la base de datos, además de evitar errores de redundancia. La estructura del modelo de datos se basa en una clave primaria (*id_linea_costa*) y una serie de claves foráneas (*id_catalogo_playa*, *id_tipologia_nv4*, etc.) que se vinculan a un conjunto de tablas con información temática relacionada (Fernández et al., 2015). Los conjuntos del modelo son los siguientes (ver Figura 3.21):

- ⇒ Conjunto 1: incluye la tipología geomorfológica de la línea de costa, dividida en 4 niveles jerárquicos según el grado de desagregación de los mismos. Dada la actual importancia que ha adquirido la ocupación antrópica del frente litoral andaluz, las formaciones de carácter natural han sido complementadas con una tipología que engloba las infraestructuras costeras existentes.
- ⇒ Conjunto 2: contiene la caracterización básica cualitativa de todas aquellas variables naturales (acantilados, dunas, playas) y antrópicas (ocupación urbana, infraestructuras litorales, alteraciones de playas) que se identifican en la zona de influencia del oleaje.
- ⇒ Conjunto 3: engloba variables procedentes del proceso de digitalización. En él se caracteriza cada tramo de línea de costa digitalizado en función a su digitalizador, la fuente utilizada para el levantamiento de datos, la fecha de la misma (estación astronómica en función al perfil morfodinámico y afluencia turística) y si ha sido tratada previamente para su correcta georreferenciación.

⇒ Conjunto 4: comprende un enlace directo que vincula cada tramo de línea de costa con su playa homóloga en la web de la Guía de Playas del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). En él se describen exhaustivamente los aspectos físicos y ambientales más relevantes de cada playa, además de incluir un apartado con los accesos y servicios disponibles en las mismas.

⇒ Conjunto 5: describe la toponimia oficial de cada tramo de línea de costa digitalizado en función a los productos cartográficos derivados de las principales instituciones y organismos afines (aerogúas, cartas náuticas, web del MAPAMA, SIGLA y SSLMM).

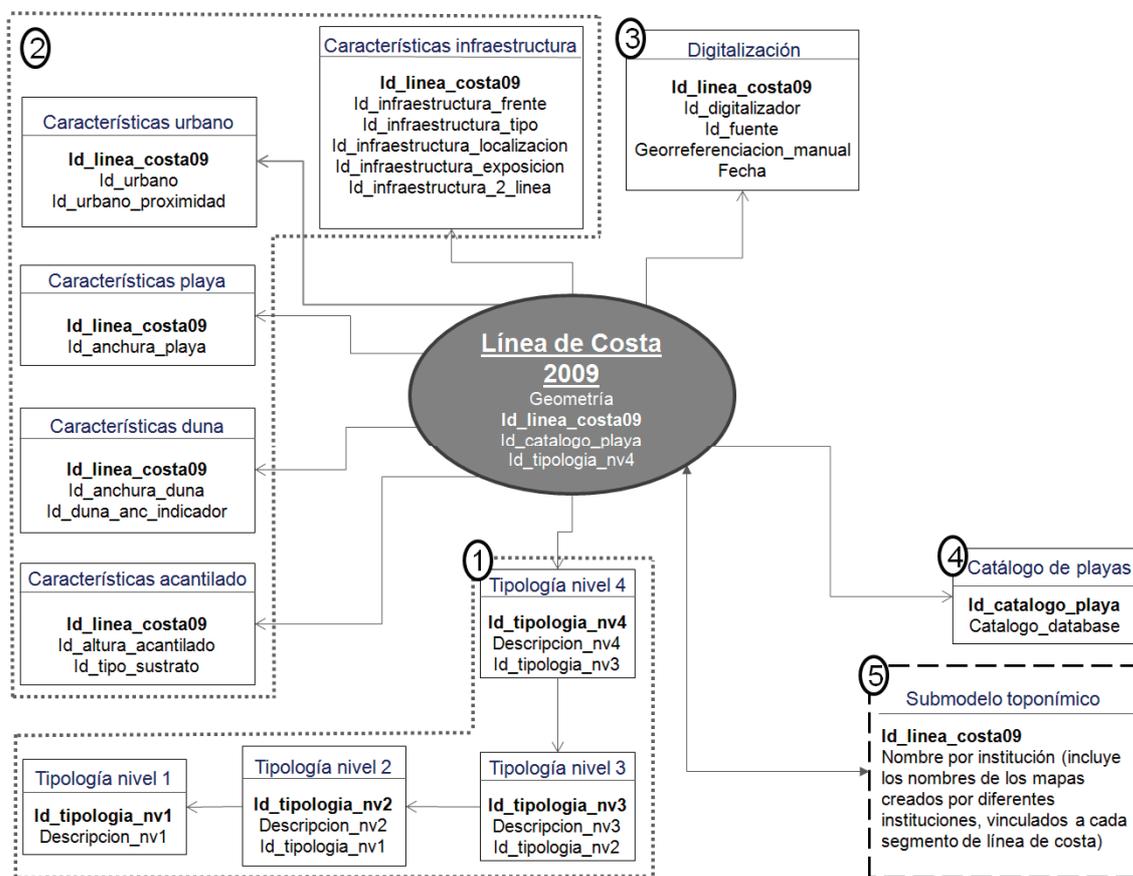


Figura 3.21. Modelo de datos original de la línea de costa de 2009.
Fuente: modificado de Fernández et al., 2015.

Para el levantamiento *ex novo* de las líneas de costa para la fecha posterior (2011) y anteriores (2001, 1977 y 1956) se ha realizado una labor de **desactualización de la geometría de la línea de costa original de 2009**, lo cual garantiza la presencia de todas las tablas del modelo inicial. Además de la propia componente geométrica, se ha llevado

a cabo la **modificación de la totalidad de la componente alfanumérica de la línea de costa de 2011** (la más actual) **y de parte de ella** (modificación parcial) **para el resto de líneas de costa**. Esta labor de desactualización de la información alfanumérica se ha llevado a cabo mediante **2 operaciones**:

- ⇒ **Modificación de la componente alfanumérica**, adaptando una serie de tablas a las características específicas de la costa para cada año de estudio (ver Figuras 3.21 y 3.22). Las tablas objeto de desactualización describen, en general, 2 grandes grupos de información. El primero de ellos aborda la caracterización morfológica del frente costero, expresada mediante la tipología de línea de costa en sus 4 niveles jerárquicos -conjunto 1- (ver Figura 3.23), así como la caracterización de elementos antrópicos del mismo (conjunto 2). El segundo grupo describe las características más importantes observadas durante el proceso digitalizador, tales como el año de la fuente o necesidad de georreferenciación manual (conjunto 3).
- ⇒ **Generación de nuevas tablas y campos**, correspondientes a 2 grupos (ver Figura 3.22). El primero de ellos, directamente relacionado con el proceso de digitalización, describe, por una parte, los campos de las variables que influyen en los niveles de incertidumbre en función de los errores geométricos (tanto cuadráticos como potenciales) de cada línea de costa (conjunto 4). Por otra parte, describe el criterio de fotointerpretación adoptado para cada tramo, según los conceptos de líneas de costa larga/corta y *proxies backshore/foredune* y *HWL* (conjunto 5). El segundo grupo de tablas de nueva creación describe datos de necesaria consideración para el proceso de cálculo y representación de tasas (conjunto 6), tales como la identificación de tramos incluidos o excluidos del cálculo, tipo de alteración antrópica del frente costero y fecha de la fuente de datos utilizada para los tramos excluidos (tramos con ausencia de datos o zonas acantiladas). De igual forma se describen, dentro del mismo grupo, características de las fuentes de datos de vital importancia para el cálculo de tasas, como son la fecha detallada de los fotogramas de cada vuelo (en formato mm/dd/aaaa) y la precisión de la línea de costa digitalizada en función a las características visuales de la ortofotografía utilizada (para futuros cálculos estadísticos ponderados, no contemplados en el presente trabajo).

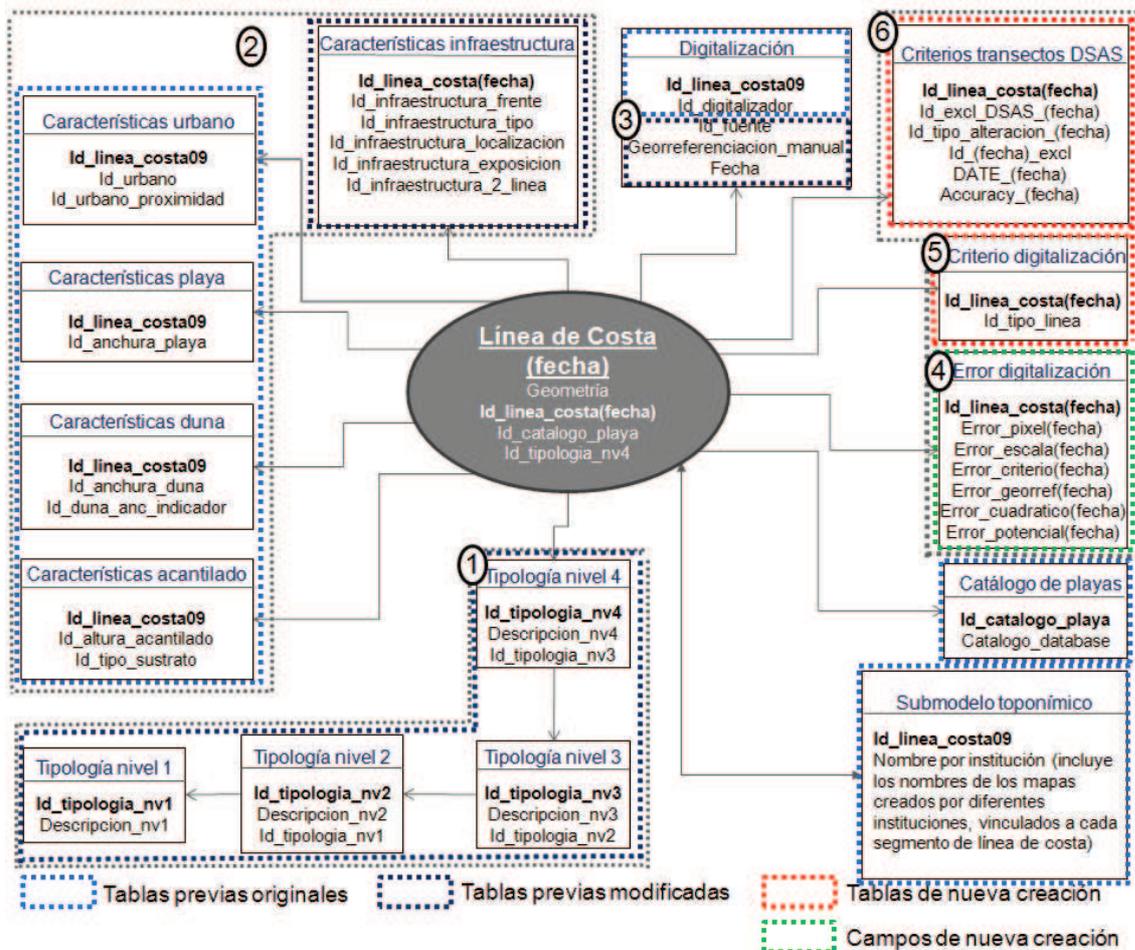


Figura 3.22. Modelo de datos final de las líneas de costa para cada fecha de estudio.
Fuente: modificado de Fernández et al., 2015.

NIVEL1	descriptor	NIVEL2	descriptor	NIVEL3	descriptor	NIVEL4	descriptor		
1 PLAYAS		10	Indiferenciadas						
		11	sin dunas ni acantilado						
		12	con acantilado	120	indiferenciado				
				121	con plataforma litoral				
		13	con dunas	122	a plomo				
				130	indiferenciado				
				131	con acantilado	1311	con plataforma litoral		
132	con plataforma litoral								
14	con plataforma litoral	140	con plataforma litoral						
15	asociadas a costas rocosas	150	indiferenciadas						
16	asociadas a formaciones sedimentarias	151	con plataforma litoral						
		160	indiferenciadas						
161		161	con plataforma						
		200	Indiferenciada						
2 COSTA ROCOSA		21	baja	210	indiferenciada				
		22	acantilada	211	con plataforma				
				220	indiferenciada				
221	con plataforma litoral								
222	a plomo								
3 ESTUARIOS, CAÑOS DE MARISMA		30 Estuarios, caños de marisma indiferenciado							
		31	Estuario	311	cauce natural				
				312	cauce modificado				
		313	cauce artificial						
32	Caño mareal	321	cauce natural						
		322	cauce modificado						
		323	cauce artificial						
4 COSTA ANTROPIZADA		40 Costa antropizada indiferenciada							
		41 Puertos							
		42 Aeropuertos							
		43	Infraestructuras costeras	430	indiferenciada				
				431	transversales	4310	indiferenciada	4310	indiferenciada
						4311	diques (desembocadura)	4311	diques (desembocadura)
						4312	espigones	4312	espigones
				4313	embarcadero	4313	embarcadero		
				432	longitudinales	4320	indiferenciada	4320	indiferenciada
		4321	muro de defensa			4321	muro de defensa		
4322	dique escollera	4322	dique escollera						
4323	paseo marítimo	4323	paseo marítimo						
433	mixta	4330	indiferenciada	4330	indiferenciada				
		4331	espigones en T	4331	espigones en T				
4332	espigones/escollera	4332	espigones/escollera						
44 Rellenos antropicos									
45 Extracciones antropicos									
5 OTROS		51 Isla							

Figura 3.23. Esquema de la tipología jerárquica de la línea de costa (4 niveles).
Fuente: elaboración propia.

3.4.- METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE TASAS DE EROSIÓN E INDICADORES TEMÁTICOS

3.4.1.- CÁLCULO DE TASAS DE EROSIÓN

3.4.1.1.- ANÁLISIS CUANTITATIVO (DSAS)

El análisis evolutivo de la costa andaluza se ha realizado mediante la herramienta **Digital Shoreline Analysis System (DSAS)**, desarrollada por el *United States Geological Survey (USGS)* como extensión del software propietario ArcGis® (Thieler et al., 2009). Supone un instrumento analítico útil al realizar un seguimiento estadístico exhaustivo de la evolución de las líneas de costa implementadas en un Sistema de Información Geográfica, que tal y como se aborda en el Capítulo 2 del presente trabajo, es utilizado por multitud de autores para el cálculo de tasas de erosión desde escalas locales (Albuquerque et al., 2013; Darsan, 2014) hasta nacionales (Kabuth et al., 2014). La disponibilidad de fuentes de datos históricas fiables hasta la actualidad permite realizar cálculos inferenciales con cierta precisión sobre el comportamiento evolutivo costero futuro (Gorokhovich y Leiserowiz, 2012; Maio et al., 2012).

La herramienta basa su funcionamiento en base a dos elementos geométricos de nueva creación, incluidos en el modelo de datos y descritos a continuación:

- ⇒ Por una parte, una **línea base**, digitalizada manualmente y trazada de forma paralela a las líneas de costa que participan en el cálculo de las tasas (ver Figura 3.25). La longitud y el carácter sinuoso de la costa andaluza necesita de la **modificación de la estructura original** de la línea base para su adaptación a la morfología de la franja litoral, asegurando así la correcta distribución y ortogonalidad de los transectos posteriormente generados. Se ha procedido a la segmentación de la línea base en función a las diversas discontinuidades (naturales o antrópicas) del área de estudio. Dicha segmentación tiene una clara intencionalidad aplicada, sirviendo como división de los diferentes comportamientos evolutivos existentes a la hora de generalizar los resultados mediante medias móviles (ver apartado 3.5.3).
- ⇒ Por otra, los **transectos**, generados automáticamente de forma preestablecida (*pre-set*) a partir de la línea base y perpendiculares a las líneas de costa (ver Figura 3.25). Se ha realizado un **muestreo espacial cada 50 m. para todo el ámbito de estudio**, obteniéndose un total de **15.069 transectos**, utilizados para el cálculo de cada período de estudio. La ya mencionada sinuosidad del

litoral andaluz, principalmente de la vertiente mediterránea, ha obligado a la **modificación** manual de, aproximadamente, el **30% del total de transectos**, labor compleja y costosa pero necesaria para **garantizar la ortogonalidad** de los mismos respecto a la línea de costa (ver Figura 3.24). Se han excluido del cálculo aquellas zonas que, por sus características naturales, no están definidas como objetivos dentro del presente estudio, tales como estuarios y espacios de marisma. Cabe destacar la inclusión dentro del cálculo (aunque no en los resultados) de sectores acantilados sin playa y de infraestructuras transversales cuya presencia supone la alteración significativa de los resultados, así como de diversos tramos costeros donde la fuente de datos es imprecisa o, en el peor de los casos, inexistente.

La utilidad de los transectos en este trabajo de investigación radica, además de en su capacidad para realizar mediciones lineales, en 3 características adicionales:

- Su carácter ortogonal a la línea de costa (intersección espacial) los hace idóneos para la **unión de la información alfanumérica asociada al modelo de datos de línea de costa y la generada durante el cálculo de tasas de erosión** (ver apartado 3.4.3), convirtiéndose en la entidad geométrica fundamental de la presente Tesis Doctoral para el cálculo de tasas.
- La prolongación *onshore* de la línea base habilita a los transectos para la obtención de **información temática asociada a la parte continental** (geología, etc.), no contempladas en este trabajo.
- La prolongación de los transectos mar adentro hasta una distancia de 2.000 m. posibilita, dada su perpendicularidad respecto a la línea de costa, la generación de **4 entidades paralelas** de representación **puntual** de los resultados, desarrolladas en el apartado 3.5 del actual capítulo.

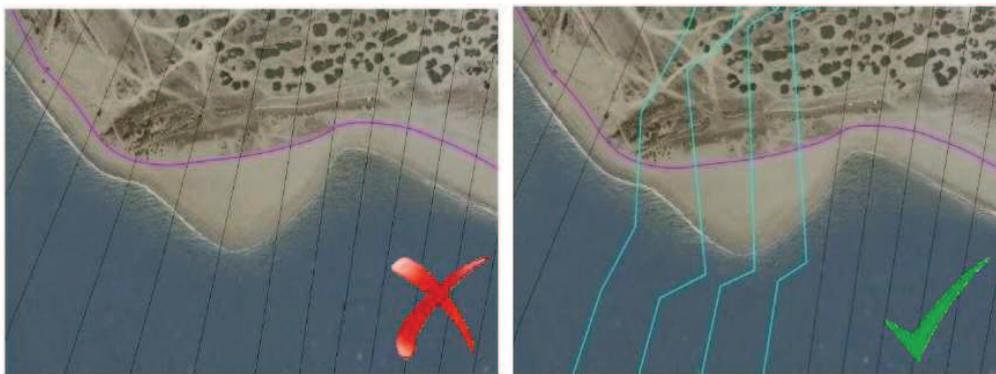


Figura 3.24. Corrección manual de transectos para garantizar su ortogonalidad a la costa.
Fuente: elaboración propia.

El cálculo *DSAS* basa su funcionamiento en la **medición de la distancia absoluta** entre las intersecciones de cada transecto con las líneas de costa intervinientes en cada período de estudio, tomada como base para los análisis de **cálculos estadísticos posteriores** (ver Figura 3.25). Las mediciones de las distancias absolutas se realizan en función a dos criterios: distancia entre la línea de costa más cercana y más lejana a la línea base (*Shoreline Change Envelope –SCE-*), expresada en valores absolutos, y distancia entre la línea de costa más antigua y más actual (*Net Shoreline Movement -NSM-*), expresada en valores enteros. Determinada la inclusión de dos líneas de costa por período, ambos valores coincidirán en valor, aunque no necesariamente en signo.

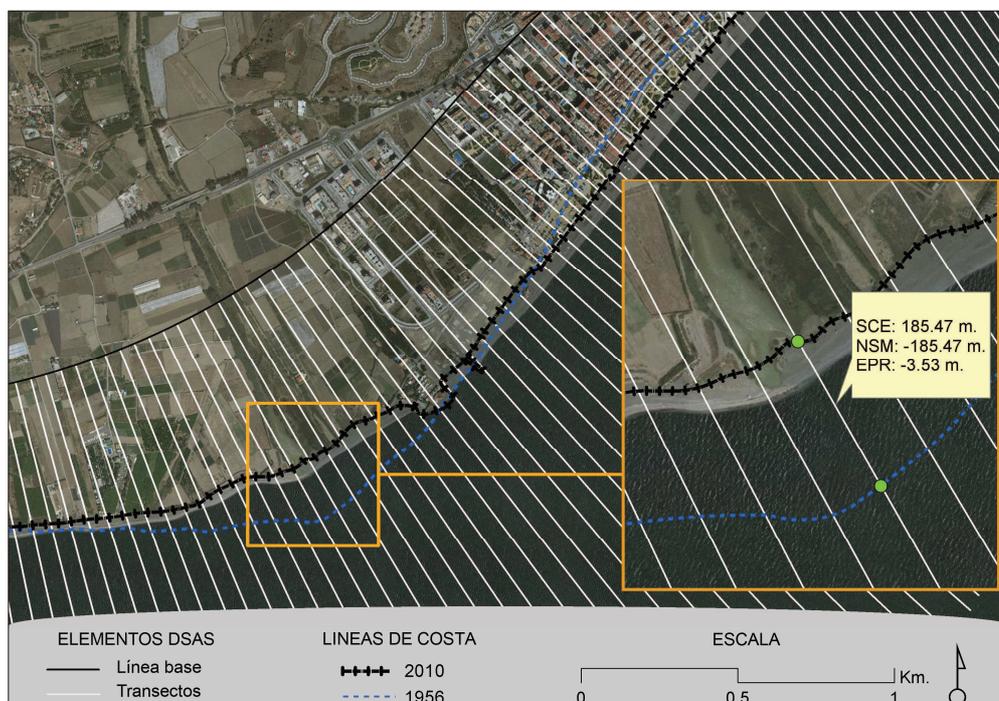


Figura 3.25. Metodología de cálculo de la herramienta *DSAS*.
Fuente: elaboración propia

3.4.1.2.- MÉTODOS DE CÁLCULO

La herramienta *DSAS* es capaz de calcular tasas de cambio en base a 4 métodos estadísticos distintos, según las necesidades analíticas del estudio y las características (fiabilidad y disponibilidad) de las fuentes de datos utilizadas para el mismo.

Así, en primer lugar, destaca el cálculo de la **Tasa de Punto Final o *End Point Rate (EPR)*** como resultado de la división de la distancia existente entre las líneas de costa y el intervalo temporal transcurrido entre la más antigua y la más reciente, expresado en metros por año (m./año). Es el método más sencillo y, por ello, el más utilizado tradicionalmente en el cálculo de tasas de erosión costera (Dolan et al., 1991; Prieto et al., 2012; Martín et al., 2013; Ozturk et al., 2015). Se exige un alto nivel de precisión en los datos, dado que el uso de un reducido número de posiciones de línea de costa puede alterar de forma notable los resultados obtenidos, siendo necesarias un mínimo de dos.

La **media de las tasas o *Average Of Rates (AOR)*** propone calcular la *EPR* para cada par de posiciones de líneas de costa y realizar una media aritmética de las tasas obtenidas, con el fin de detectar cuantitativamente los cambios de tendencia anteriormente nombrados. Es preciso, por tanto, el conocimiento de los errores en las medidas, con el objetivo de fijar un intervalo temporal mínimo entre los datos para que éstos sean representativos (Dolan et al., 1991; Del Río, 2007; Genz et al., 2007).

La tasa de **regresión lineal o *Linear Regression Rate (LRR)*** ajusta los datos mediante mínimos cuadrados, dando como resultado una línea de regresión donde la tasa viene definida por la pendiente de la recta. La robustez estadística que lo sostiene lo hacen un método de cálculo muy utilizado actualmente (Morton et al., 2004; Genz et al., 2007; Ozturk et al., 2015), no obstante, sus principales desventajas residen en la sensibilidad del mismo frente a *outliers* (Dolan et al., 1991) y en la imposibilidad de detectar cambios en la tendencia evolutiva litoral. En el caso del **método ponderado de regresión lineal o *Weighted Linear Regression (WLR)***, los datos son analizados con distinto énfasis en función a la fiabilidad de los mismos. En este caso, la ponderación viene determinada como una función de la varianza en la incertidumbre de las mediciones realizadas (Genz et al., 2007). La fiabilidad de los resultados está directamente relacionado con la cantidad de líneas de costa que intervienen en el análisis, siendo necesarias un mínimo de 3.

La tasa de **muestreo por subconjuntos o Jack Knife Rate (JKR)** es una técnica que permite averiguar la precisión del muestreo estadístico mediante el uso de un subconjunto de datos conocidos, de forma iterativa y excluyendo uno distinto cada vez, obteniéndose la tasa de cambio promediando los resultados de los análisis realizados. Al ser promediada, la tasa es menos susceptible a los efectos de los *outliers*, no obstante, asume una tendencia lineal homogénea además de requerir un volumen importante de cálculos. Su valor estadístico es limitado cuando se disponen de escasos datos de partida (Del Río, 2007; Genz et al., 2007).

La enorme cantidad de datos analíticos de esta Tesis Doctoral ha condicionado el uso de **2 líneas de costas por cada cálculo**, limitando de forma notable el abanico metodológico de opciones, siendo la Tasa de Punto Final o *End Point Rate (EPR)* uno de los posibles. Si bien este método impide la detección de cambios tendenciales dentro de un mismo análisis global, la segmentación del período total en intervalos temporales más cortos permite la localización (en función de la disponibilidad de las fuentes de datos) de cambios de tendencia en el comportamiento evolutivo del frente costero. Por ello, se ha determinado la **Tasa de Punto Final o End Point Rate (EPR)** como el **método de cálculo idóneo para el presente trabajo de investigación**.

3.4.1.3.- PERÍODOS DE CÁLCULO

Las fechas de estudio obedecen a la disponibilidad de las fuentes de datos oficiales, agrupadas según el período global (1956-2011) y una serie de subperíodos temporales estratégicos, con el fin de detectar cambios de tendencia en la evolución costera. Los intervalos temporales analizados son los siguientes:

- ⇒ **1956-2011**: El período 1956-2011 recoge la evolución global del período de análisis, si bien por la baja calidad radiométrica y geométrica de la ortofotografía de 1956, se utilizará como información de contraste para evidenciar el interés de la segmentación en diferentes subperíodos.
- ⇒ **1956-1977**: El subperíodo 1956-1977 registra las primeras manifestaciones de los procesos erosivos entre los períodos analizados individualmente. Tiene una gran importancia urbanística, ya que coincide con la aprobación en 1956 de la primera *Ley del Suelo* estatal española³³.

³³ *Ley de 12 de mayo de 1956 sobre régimen del suelo y ordenación urbana*. Boletín Oficial del Estado, 14 de mayo de 1956, núm. 135. p. 3.106-3.134. (Disposición derogada)

- ⇒ **1977-2001:** El subperíodo 1977-2001 muestra los cambios ocurridos en el litoral durante un período intenso de ocupación del frente costero anterior a la regulación del mismo mediante la *Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas* y a la aplicación de medidas correctoras blandas y deslindes sobre el litoral a principios del siglo XXI.
- ⇒ **1977-2011:** El subperíodo 1977-2011 define, junto con el subperíodo correlativo anterior (1956-1977), los dos grandes períodos de análisis temporales de la erosión a largo plazo. Los cambios producidos a lo largo de todo el frente litoral en los últimos 35 años han alterado muy intensamente la dinámica litoral. Dada la calidad de las fuentes de datos (0,5 m. de resolución espacial) y su intervalo temporal estratégico, **se ha determinado como el período de referencia para la presente Tesis Doctoral.**
- ⇒ **2001-2011:** El subperíodo 2001-2011 recoge un período de gran interés, dada la disponibilidad de datos de alta resolución (0,5 m.) en un período temporal intermedio entre la última ortofotografía histórica con razonable calidad geométrica (1977) y la actual (2011). Ayuda a la identificación de tendencias actuales a medio plazo, con el fin de detectar cambios más actuales en el litoral como consecuencia del *boom* urbanístico y del efecto de la aplicación de medidas correctoras blandas y deslindes para el cumplimiento de la *Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas*.

3.4.2.- CÁLCULO DE INDICADORES TEMÁTICOS

La caracterización tanto cualitativa como cuantitativa del ámbito litoral (playas, acantilados, dunas, componente urbana, tasas de erosión...) es de primordial interés a la hora de realizar estudios sintéticos litorales a través de índices e indicadores, constituyendo un claro ejemplo de la utilidad práctica de los datos contenidos en el modelo de datos.

En este apartado se describe la metodología para el cálculo de un conjunto de indicadores e índices sintéticos extraídos del tratamiento conjunto de las tablas alfanuméricas de la base de datos de las líneas de costa y del cálculo de tasas de erosión. En primer lugar se detallan los resultados obtenidos directamente del uso de las entidades geométricas contempladas con anterioridad (líneas de costa, transectos, línea base), basados en el **cálculo de la playa útil** como indicador ambiental y turístico. En

segundo lugar se define una muestra de indicadores basados en los conceptos de línea de costa (corta y larga) y sus utilidades prácticas de cara a la obtención de **indicadores a nivel municipal de gran interés para la Administración**. En tercer y último lugar, se detalla una muestra de **indicador sintético litoral (sensibilidad de playas)**, basado en el análisis de una serie de variables cuantitativas obtenidas con anterioridad, con una clara utilidad ambiental y turística.

3.4.2.1.- INDICADORES DE CÁLCULO GEOMÉTRICO

La acotación de los límites superior e inferior de la playa seca, derivados de los *proxies* utilizados, permite definir el perímetro de la misma (Ojeda, Díaz, et al., 2013), obteniéndose datos de la “**playa útil**” para cada fecha de estudio, tanto desde el punto de vista superficial como su anchura expresada en metros lineales.

⇒ **Cálculo de superficie:** mediante técnicas de análisis vectorial se han obtenido, a través del uso de los 2 *proxies* de cada fecha, **los polígonos de playa útil para cada año** (ver Figura 3.26), integrados en el modelo de datos como entidades individualizadas (ver apartado 3.4.3). El cálculo superficial permite el seguimiento de la evolución del área perdida o ganada entre períodos, a pesar de no ser el fiel reflejo del fenómeno erosivo tridimensional (ver Capítulo 2). **Es el cálculo más preciso, al ser continuo espacialmente.**



Figura 3.26. Criterios para la delimitación de la playa útil de 2011: a) Límite interno de la playa seca (*backshore/foredune*), b) Marca húmeda (*HWL*), c) Superficie de “playa útil”.

Fuente: elaboración propia.

⇒ **Cálculo de anchura lineal:** a partir de la intersección de la capa poligonal previamente generada y los transectos utilizados para el cálculo de tasas (corregidos para garantizar su ortogonalidad) se obtiene **la anchura de la playa útil en metros** (ver Figura 3.27), **integrada en la entidad de transectos** para su comparación entre períodos. El resultado es idóneo para identificar variaciones espaciales de la anchura de la playa alta (*backshore*). Como

operación derivada de la obtención de la anchura, y partiendo del conocimiento de la equidistancia de los transectos (50 m.), se puede estimar la superficie de playa para cada fecha de estudio. No obstante, al tratarse de una variable discretizada cada 50 m. de intervalo, el cálculo superficial a partir de los datos lineales constituye un resultado menos preciso que el citado con anterioridad, mucho más exacto.

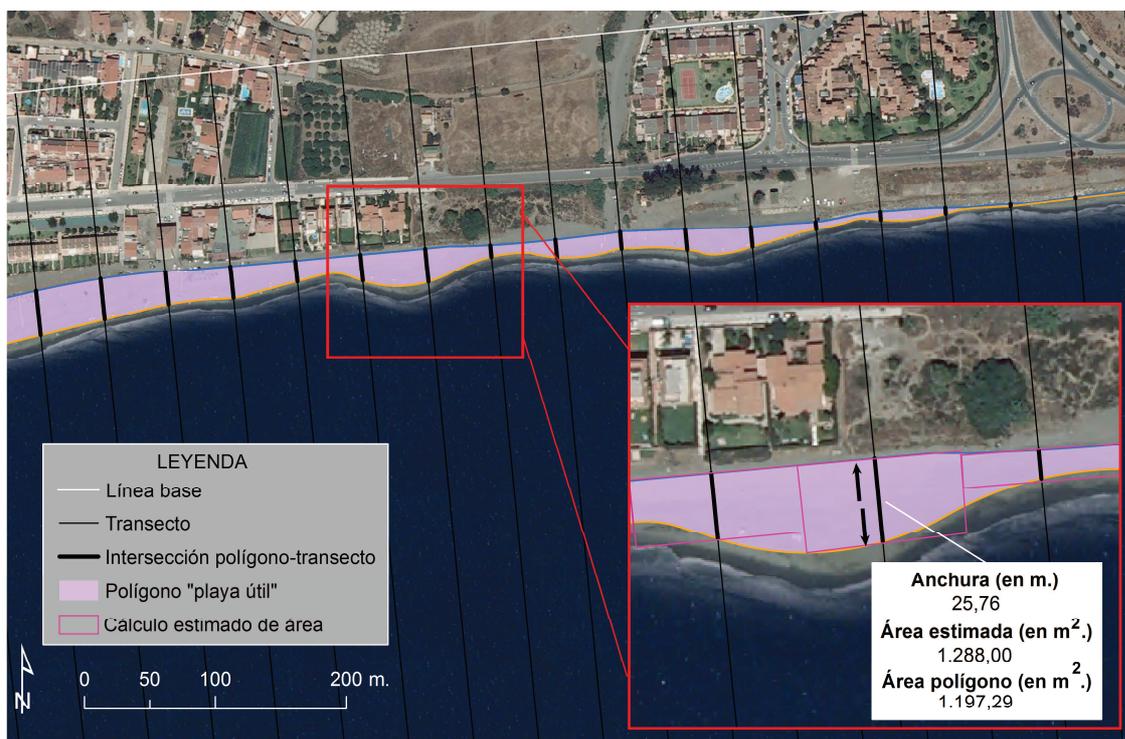


Figura 3.27. Intersección entre la capa poligonal de "playa útil" y transectos para obtener la anchura y el área estimada de la misma.
Fuente: elaboración propia.

3.4.2.2.- INDICADORES DE INTERÉS PARA LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA

La mayor parte de los datos que la Administración Pública posee en materia de costas se muestran mediante indicadores a nivel municipal u otra entidad administrativa, expresados como porcentajes en relación a la longitud de costa (porcentaje de playa antropizada, longitud de playas por municipio...). Este hecho justifica que en el modelo de datos inicial de 2009 ya se contemplara como necesario el uso de distintos conceptos de línea de costa. En este sentido, se definieron los **conceptos de líneas de costa larga y corta** (Díaz et al., 2012) (ver Figura 3.28):

⇒ La **línea de costa larga o fisiográfica** delimita con gran nivel de detalle todo el espacio costero influenciado por los efectos del oleaje y marea, prestando

especial interés no sólo en las formaciones litorales expuestas sino también en las protegidas (estuarios y caños de marea cuya anchura en bajamar sea igual o superior a 15 m.) y en el límite externo de infraestructuras. Esta delimitación, fisiográficamente correcta, resulta de utilidad para la elaboración de indicadores relacionados con la gestión del litoral y el medio marino (por ejemplo caracterización de la costa ante un vertido de petróleo), si bien puede ser confusa para la comparación de indicadores de estado y seguimiento ambiental elaborados con criterios estadísticos, ya que éstos suelen asociar la línea de costa exclusivamente al frente costero expuesto al oleaje.

⇒ La **línea de costa corta o frente costero** delimita el denominado “frente costero expuesto”, evitando su recorrido detallado por marismas, estuarios y límites externos de las infraestructuras en contacto directo con el mar, siendo de gran utilidad para estudios estadísticos litorales (por ejemplo, porcentaje de litoral antropizado por municipio).



Figura 3.28. Diferencia entre los conceptos de líneas de costa larga (izquierda) y corta (derecha) en El Puerto de Santa María (Cádiz).
Fuente: elaboración propia.

A nivel municipal son muchos los indicadores que pueden ser extraídos según la información alfanumérica temática de la base de datos como, por ejemplo, la caracterización litoral por tipología del frente costero, indicadores de alteración antrópica de playas o de presencia de espacios protegidos, desarrollados en el Capítulo 4.

3.4.2.3.- ÍNDICES SINTÉTICOS COMPLEJOS

Hoy en día, cualquier estudio centrado en la zona costera independientemente de cuál sea su objetivo, requiere de la existencia de una potente información de detalle. Esta reflexión, a pesar de ser incorporada en numerosos documentos de planificación, se ve confrontada por la ausencia, a veces inexplicable, de información sobre litoral y medio marino a escalas de detalle (Díaz et al., 2012).

En esta Tesis Doctoral, la inclusión en el modelo de datos de elementos geométricos y gran cantidad de información alfanumérica permite el cálculo de indicadores de carácter sintético, de gran interés para la evaluación ambiental, turística, etc.

En este epígrafe se presenta la metodología seguida para el cálculo de un **índice expresivo de la sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico**. Propuesto y desarrollado inicialmente por Ojeda et al. (2013), se ha realizado a partir del cálculo e integración de diversas variables presentes en el modelo de datos y calculadas para este trabajo de investigación: **la presencia de dunas costeras, la anchura de la playa o playa disponible y las tasas de erosión** (ver Figura 3.29). Una vez calculadas las variables, se ha procedido a la construcción del indicador a partir de la agregación de éstas. Previamente, las variables han sido normalizadas con el objeto de expresarlas en unidades similares. Para tal fin los valores de éstas se normalizan entre 0 y 1, mediante un reescalado lineal (Ojeda et al., 2013) que asigna un 1 al valor máximo de la serie y un 0 al valor mínimo. La expresión sintética del indicador es la siguiente:

$$S = (D+A+P)-E$$

Donde; S = Indicador de sensibilidad. D= Duna. A = Anchura de la playa o playa disponible. P= Progradación E =Erosión.

- ⇒ La **anchura de playa**: procedente de la intersección lineal entre la entidad de transectos y la acotación de los 2 *proxies* (ver apartado 3.4.2.1). En este sentido, tal y como ya se ha comentado en el apartado 3.4.2.1, se ha calculado la anchura lineal de la playa útil para toda la costa andaluza y para todos los períodos de análisis. Se entiende que a mayor anchura de playa, menor sensibilidad de la playa a su pérdida como recurso turístico.
- ⇒ Las **tasas de erosión**: resultantes del cálculo de *DSAS* y tratada independientemente según su comportamiento (erosión o progradación),

supone una variable fundamental al definir y cuantificar la tendencia evolutiva del litoral desde el punto de vista espacial y temporal. Tal y como ya se ha comentado se disponen de los cálculos de tasas de erosión para la costa andaluza y diferentes períodos. Se entiende que a mayor tasa de erosión, mayor sensibilidad de la playa a su pérdida como recurso turístico.

⇒ La **presencia de dunas costeras**: procedente del modelo de datos inicial de línea de costa y actualizada para la última fecha de referencia (2011), se ha descrito la duna de manera cuantitativa, quedando recogida en el campo `id_duna_anc_indicador`. El cálculo se ha realizado a partir de la medición lineal de éstas para cada tramo litoral durante el proceso de levantamiento de datos, considerando el **valor medio** de anchura a partir de **distintas mediciones realizadas en cada segmento**. Supone una variable de importancia destacada al implicar la disponibilidad de reservas sedimentarias, garantizando la existencia de playa ante eventos erosivos. En este sentido, a **mayor extensión de dunas, menor sensibilidad** de la playa a su pérdida como recurso turístico.

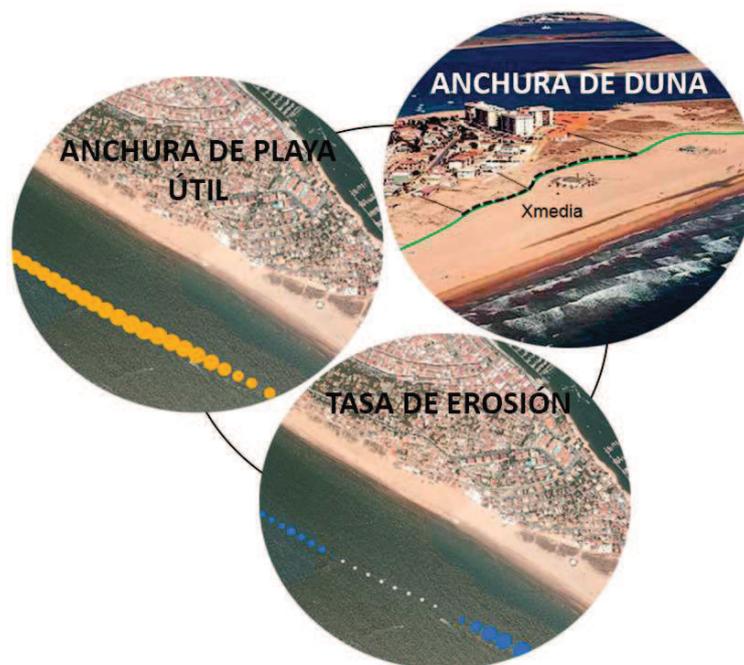


Figura 3.29. Variables intervinientes en el indicador de sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico.

Fuente: elaboración propia.

3.4.3.- INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS EN EL MODELO DE DATOS

Los resultados obtenidos del cálculo de tasas de erosión han generado un conjunto de **campos nuevos** relacionados con la entidad geométrica de los **transectos**. Cada transecto ha sido reclasificado y numerado correlativamente según la disposición de las Unidades Fisiográficas y de los Tramos, de forma inequívoca mediante una clave primaria (*id_transect*), al que se le ha asociado, mediante análisis espacial, la clave primaria de la línea base (*baseline_ID*). El cálculo íntegro de distancias totales (*Shoreline Change Envelope -SCE-* y *Net Shoreline Movement -NSM-*) y tasas de erosión (*End Point Rate -EPR-*) realizado para cada *proxy* de línea de costa y período temporal (*DSAS*) se incluyen en el conjunto 1 (ver Figura 3.30). Para facilitar la representación de los resultados obtenidos, se han generado una serie de campos donde, manteniendo la estructura del subconjunto anterior, se han dividido los valores absolutos de las tasas obtenidas (campos *EPR* de cada período y *proxy*) según su signo (conjunto 2).

Mediante técnicas de relación alfanumérica por **intersección espacial**, se han conectado las claves primarias de cada línea de costa con cada identificador de transecto, **asociando en cada transecto el modelo de datos del cálculo de tasas y el modelo de datos de línea de costa para cada fecha de estudio**.

Una vez relacionada la totalidad de información alfanumérica, es viable realizar cálculos conjuntos por períodos, imposibles de ejecutar independientemente. Dichos cálculos se detallan a continuación:

- ⇒ Contemplado como un tercer *proxy*, la **anchura lineal de la playa útil** de cada fecha (ver apartado 3.4.2.1) mantiene el identificador de cada transecto utilizado para el cálculo, permitiendo su incorporación al modelo de datos, así como la comparación entre distintas fechas (evolución temporal) para un mismo transecto (conjunto 3).
- ⇒ La relación alfanumérica de los distintos **errores de cada fecha** (tanto cuadráticos como potenciales) dentro de un mismo transecto mediante la clave primaria (*id_transect*) permite el cálculo de errores por períodos (conjunto 4).

Las **tablas geométricas poligonales de playa útil**, obtenidas mediante la unión de ambos *proxies* de línea de costa de cada fecha de estudio, han sido incorporadas al modelo de datos de cálculo de tasas, las cuales, mediante intersección con la tabla geométrica lineal de transectos, permiten obtener la anchura de la misma, contemplada anteriormente en el conjunto 3.

También de forma independiente, de cara a cálculos de indicadores temáticos de diversa índole (municipal, ambiental, etc.), se ha vinculado mediante análisis espacial la entidad de transectos con **tablas externas** de interés diverso, como son los límites administrativos o los Espacios Naturales Protegidos de Andalucía, descritos en el apartado 3.4.2.2 y contemplados en el Capítulo 4 correspondiente a los resultados.

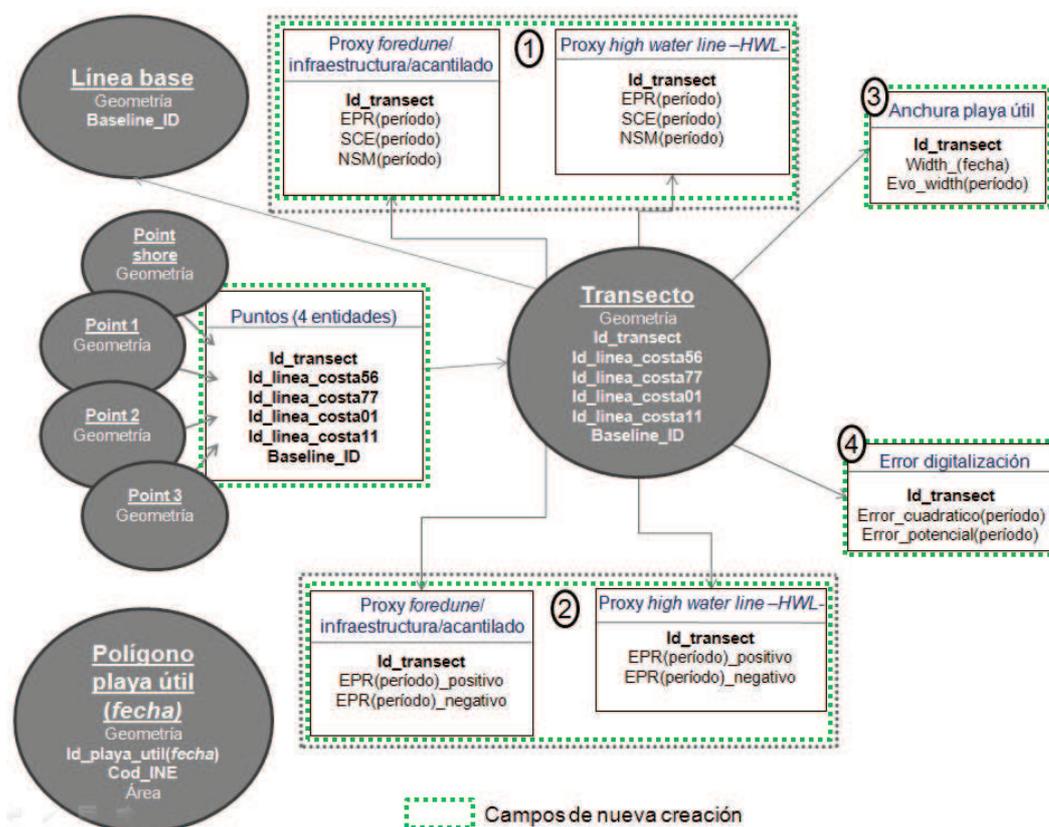


Figura 3.30. Integración de resultados en el modelo de datos a través de la entidad de transectos. Fuente: elaboración propia.

De cara al posterior tratamiento semiológico y difusión web de los resultados (ver apartados 3.5 y 3.6, respectivamente), **se ha volcado de forma bruta toda la información alfanumérica de ambos modelos de datos en 4 entidades puntuales** paralelas a la costa, correspondientes a la intersección espacial entre los transectos y 4 entidades lineales. Mientras que la primera intersección corresponde con la línea de costa de 2011 (*proxy HWL*), las 3 restantes responden a *buffers offshore* paralelos a la línea de costa a 450, 800 y 1.150 m. de la misma, respectivamente (ver Figura 3.32).

3.5.- TRATAMIENTO SEMIOLÓGICO DE LOS RESULTADOS

El volumen de datos generados y resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral hace inviable la representación total de los mismos a todas las escalas, por lo tanto, se han evaluado diferentes estrategias tanto a nivel de tratamiento semiológico como de puesta a disposición de los resultados a los usuarios finales.

Desde el punto de vista del tratamiento semiológico de los datos, se han seguido una serie de estrategias de representación y visualización para optimizar la gestión cartográfica de la ingente cantidad de datos obtenidos, mediante 4 entidades geométrica de carácter puntual:

- ⇒ Se muestran las variables cuantitativas obtenidas a través de **simbología proporcional**.
- ⇒ Para la representación a menor escala, se ha llevado a cabo un proceso de **generalización** mediante medias móviles, aprovechando la capacidad analítica del sistema gestor de bases de datos de código abierto PostgreSQL/PostGIS.

3.5.1.- REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La obtención de tasas con distinto signo según su evolución acumulativa o erosiva hizo necesaria la división de las mismas en campos diferentes, expresadas en valores absolutos para su tratamiento independiente (ver apartado 3.4.3). La extensa amplitud de valores obtenidos posibilita su representación mediante intervalos. No obstante, la agrupación en intervalos enmascararían los diversos valores integrantes de los mismos. Por ello, se ha optado por la representación mediante **símbolos proporcionales**. De esta manera, el diámetro de cada punto se define en función del valor de la tasa correspondiente.

Los valores positivos, negativos y exentos de cambio han sido representados independientemente dentro de cada nivel para cada período de estudio, tal y como se muestra en la Figura 3.31. Para una correcta interpretación de los mismos, se ha procedido a una paleta de colores lógica, comúnmente aceptada y de fácil asimilación. De este modo, las tasas de acreción costera se han representado en tono azul (R:0 G:112 B:255), las exentas de cambio en tono blanco (R:255 G:255 B:255) y las tasas de erosión en rojo (R:255 G:0 B:0).



Figura 3.31. Representación de las tasas para el período 1977-2011 en la playa de San Miguel en El Ejido (Almería).
Fuente: elaboración propia.

3.5.2.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Tal y como se detalla en el apartado 3.4.3, la representación de los resultados se ha realizado aprovechando los transectos generados por la herramienta *DSAS*, cuya prolongación *offshore* ha permitido la intersección con 4 entidades lineales paralelas entre sí (*buffers*), obteniéndose **4 entidades puntuales** y permitiendo una cómoda comparación de los resultados en los subperíodos anteriormente mencionados (ver Figura 3.32). Cada entidad puntual contiene la totalidad de información alfanumérica de los modelos de datos generados, incluyendo los valores correspondientes al *EPR* de la totalidad de períodos de estudio analizados.

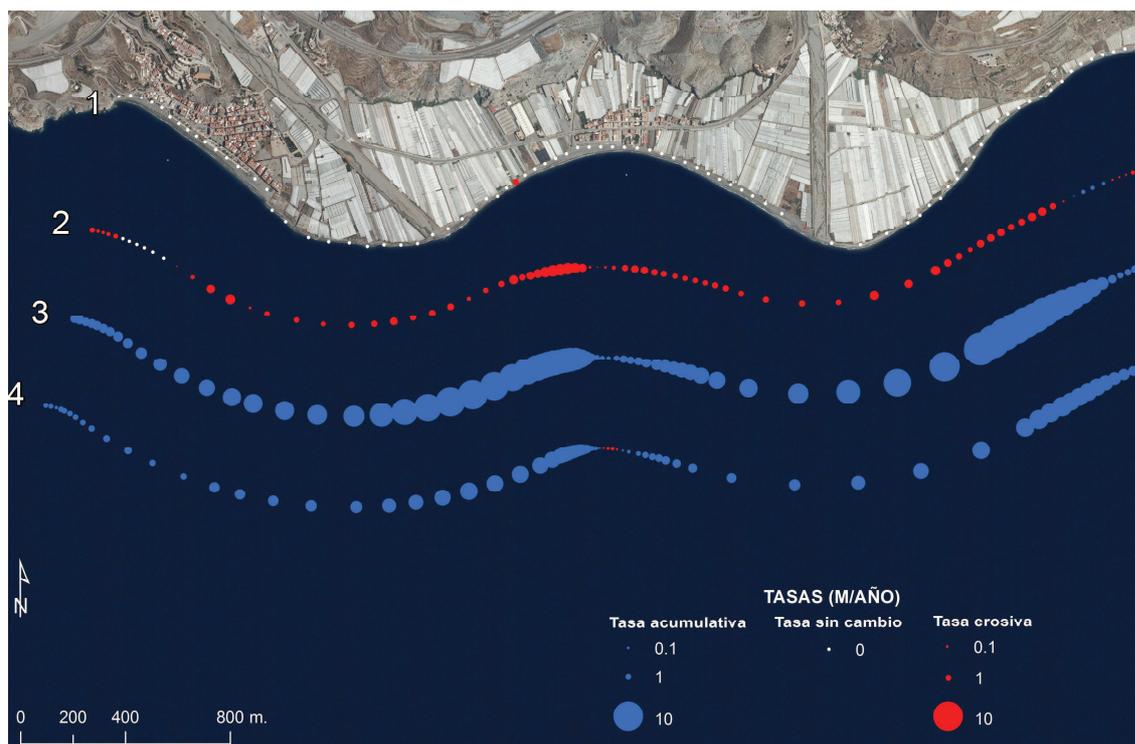


Figura 3.32. Representación de resultados en 4 entidades puntuales.
Fuente: elaboración propia.

Las 4 entidades de representación, que estarán disponibles en el visor web, han sido sustituidas exclusivamente por 3 (correspondientes únicamente a los *buffers offshore*) en la descripción de los resultados en formato papel de la presente Tesis Doctoral (ver Capítulo 4), respondiendo a las necesidades visuales que la cartografía y escala de representación requieren.

3.5.3.- GENERALIZACIÓN DE RESULTADOS

La correcta visualización de resultados depende estrechamente de la escala de representación de los mismos. De esta manera, para su uso a escalas medias se han realizado pruebas de generalización de las tasas obtenidas. Así, se han obtenido **tasas medias aritméticas generalizadas cada 1.000 m. de costa**, compuestas por 20 valores cada una, correspondiente a la equidistancia de los resultados obtenidos (ver Figura 3.33). Aprovechando la utilidad analítica del sistema gestor de base de datos de código abierto PostgreSQL/PostGIS, también se han obtenido pruebas de generalización mediante medias móviles a través de una serie ordenada por número de transectos.

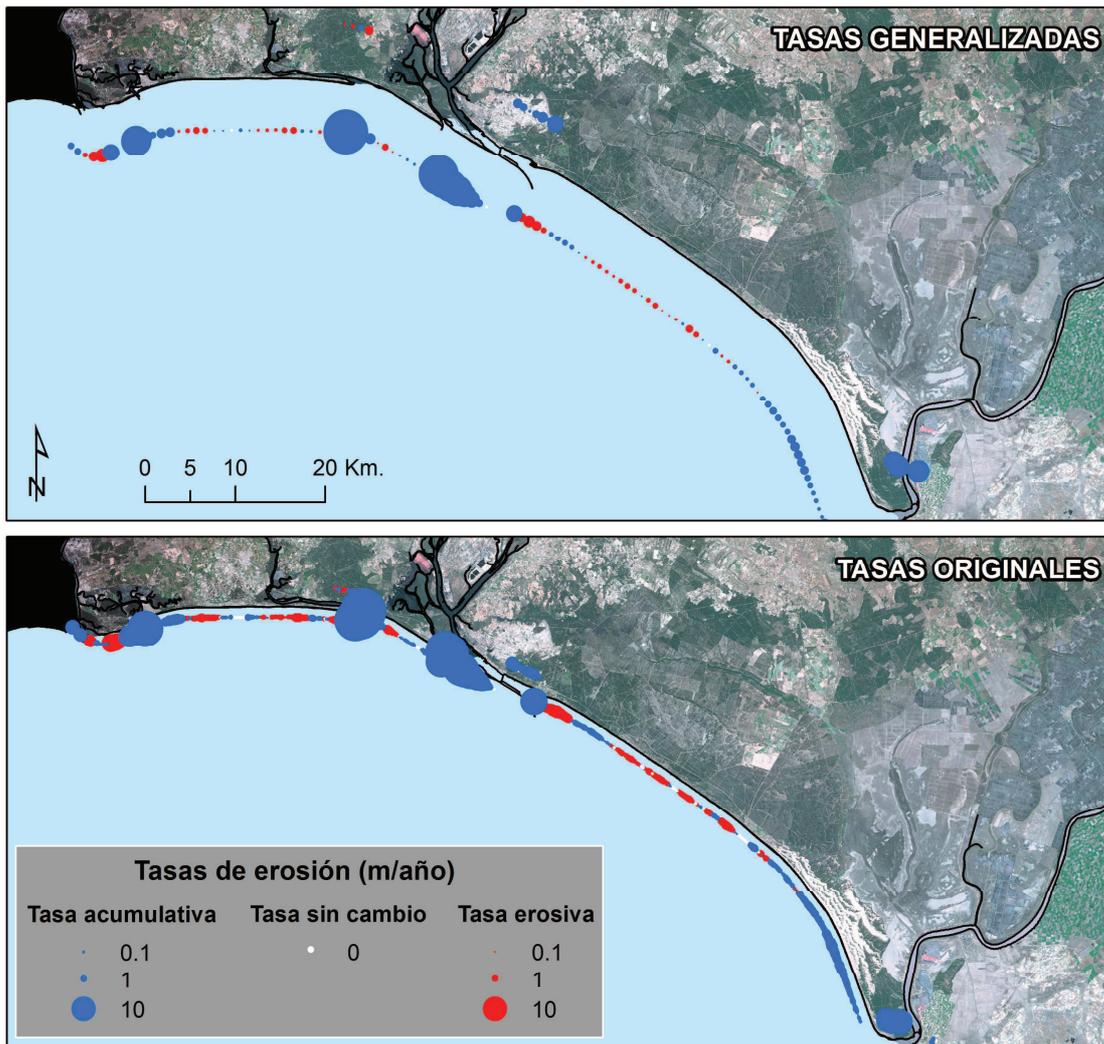


Figura 3.33. Comparación visual a escala media entre tasas generalizadas y originales.
Fuente: elaboración propia.

3.6.- ACCESO Y DIFUSION DE LOS RESULTADOS EN INTERNET. SERVICIOS OGC Y GEOVISOR WEB

Entre los objetivos planteados en esta Tesis Doctoral se encuentra aquél vinculado al compromiso de difusión de sus resultados en Internet (ver Figura 3.34). La extensión y diversidad de resultados a obtener (tasas de erosión calculadas a escala detallada para todo el litoral andaluz, para múltiples períodos, utilizando diferentes *proxies* y representadas en diferentes geometrías), hacen inviable la presentación pormenorizada de estos en formato convencional en analógico o digital (formato *pdf*).

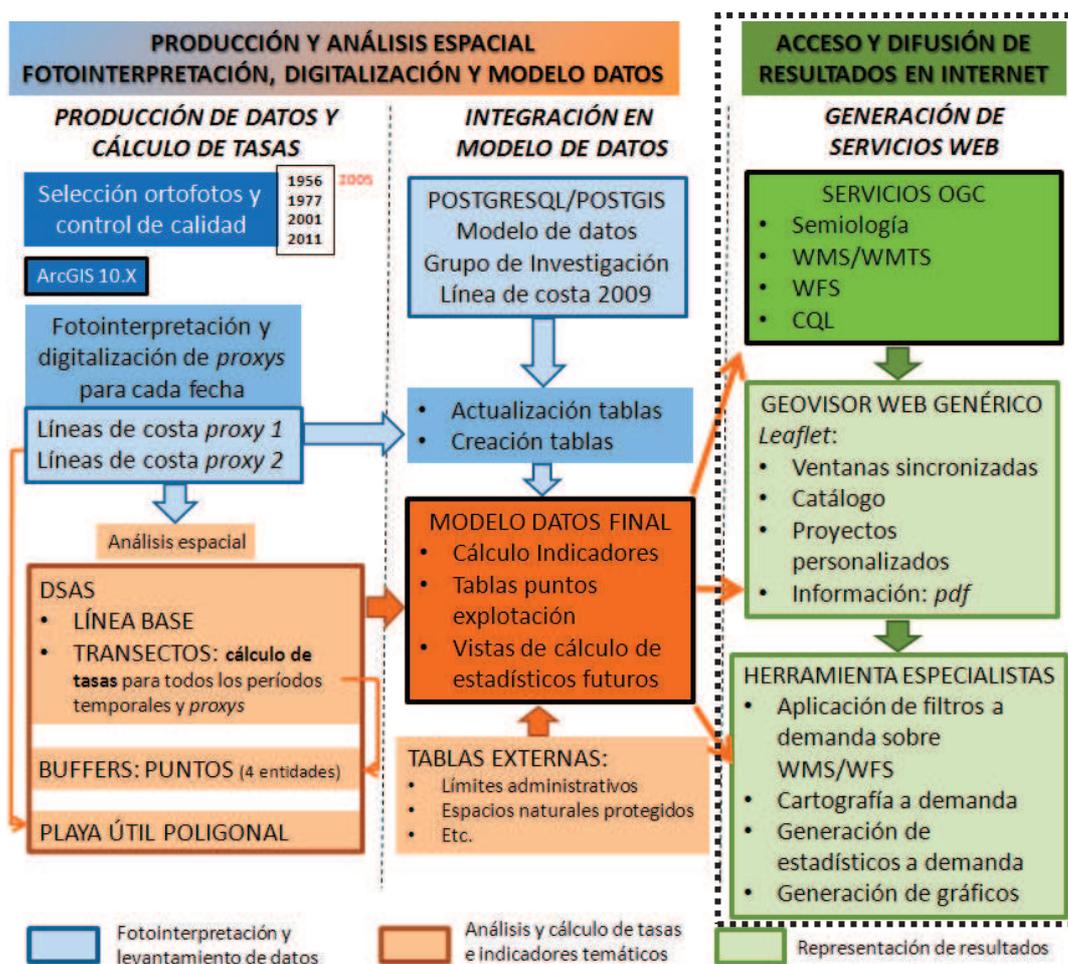


Figura 3.34. Esquema del proceso metodológico de la Tesis Doctoral.
 Fuente: elaboración propia.

Para este trabajo, junto a la difusión web tradicional de resultados basada en la generación de servicios interoperables OGC estándar que permiten el acceso a cualquier usuario que conozca la forma de acceder a estos servicios a través de un cliente externo, bien pesado (Qgis, ArcGis, etc.), bien ligero (aplicaciones desarrolladas sobre cualquier navegador -Mozilla, Chrome, etc.-), se ha pretendido dar un paso más en el acceso a los

resultados y se ha desarrollado con ayuda del Grupo de Investigación un **geovisor sobre librerías de código abierto** (OpenLayers, Leaflet), facilitando aún más el acceso a los resultados. La difusión de resultados a través de visores geográficos web es una labor ampliamente desarrollada por el Grupo, que cuenta con la amplia experiencia previa en el uso de éstos para la difusión de resultados de varios proyectos de investigación. Ya en el Capítulo 2 de este documento se enfatizó el uso actual de geovisores web como la mejor manera de permitir el acceso y la difusión de información geográfica en la web. La utilización de estas herramientas para la presentación de resultados incrementa la interoperatividad mediante el uso de estándares y facilita el trabajo colaborativo.

Dado lo anterior, la estrategia planteada para la difusión de los resultados obtenidos se basa en:

- ⇒ La generación de **servicios interoperables OGC**.
- ⇒ El diseño y desarrollo de un **geovisor web para usuarios generalistas (prototipo *Gis and Coast*)**, único elemento capaz de ofrecer al lector la posibilidad de visualizar de forma interactiva los resultados de erosión a múltiples escalas con información complementaria.
- ⇒ Incorporación al geovisor de una **herramienta para usuarios más especializados**, que necesitan de la definición de criterios específicos para la visualización y consulta de las tasas de erosión de forma detallada.

Ambas aplicaciones (visor generalista y herramienta especialista) conforman el visor “Tasas de erosión” que se alimentará de los servicios interoperables generados a partir de los resultados (ver Figura 3.34) y serán descritas en el apartado siguiente, prestando especial atención tanto a sus funcionalidades como a los softwares utilizados para su elaboración.

3.6.1.- GENERACIÓN DE SERVICIOS INTEROPERABLES

La difusión de la información en la web en esta Tesis Doctoral, se realiza en primer lugar mediante la generación de servicios interoperables estándar definidos por OGC. Estos serán el primer producto de difusión web de esta Tesis, que al utilizar estándares y especificaciones OGC, le proporcionan interoperatividad y pueden ser consultados por cualquier usuario.

La OGC ha desarrollado una arquitectura orientada a servicios (*Open Geospatial Consortium 2005*) y toda una batería de estándares de servicios web geoespaciales, bajo el nombre de *OGC Web Services (OWS)*, entre los que destacan dos grupos:

- ⇒ Los servicios web orientados a la visualización, como **WMS** y **WMTS**.
- ⇒ Los servicios web orientados a los datos (**WFS**).

Estos servicios suponen una magnífica vía para el acceso web de la información geográfica, pues permiten una reutilización directa de éstos por investigadores, políticos y ciudadanos.

Para la realización de servicios OGC en este trabajo de investigación se ha utilizado el servidor de mapas de código abierto **Geoserver 2.8.1** (escrito en Java), que sirve de implementación de referencia de los estándares del OGC.

Geoserver se comunica con el sistema gestor de la base de datos PostgreSQL/PostGIS (versión 9.5) para obtener las variables y servir las como servicios interoperables de los que se alimentarán los geovisores web.

En esta Tesis se utilizan, además, para alimentar los geovisores seleccionados:

- ⇒ Servicios **WMS/WMTS** estándar para el visor generalista.
- ⇒ Junto a los anteriores, el visor especializado utilizará los servicios **WFS** y **WMS** “filtrados” para acceder a los datos brutos y explorarlos con otras herramientas: herramientas de representación de gráficos así como para el cálculo de indicadores para ámbitos seleccionados (espacial y temáticamente) por el usuario.

3.6.2.- GEOVISOR GENERALISTA (PROTOTIPO *GIS AND COAST*)

El prototipo *Gis and Coast* constituye un visor desarrollado por el Grupo de Investigación en colaboración con la empresa Geographica Studio, que ha sido **adaptado y personalizado para la difusión de los resultados de esta Tesis**. Diseñado y pensado para usuarios generalistas, no necesariamente expertos, permite la visualización de las tasas de erosión para todas las escalas, a partir **servicios WMS/WMTS estándar previamente generados**, definidos y publicados por Geoserver (ver apartado 3.5).

Los datos se encuentran gestionados por el sistema gestor de base de datos **PostgreSQL/PostGIS** que genera vistas espaciales que pueden o no ser actualizadas dinámicamente. Estas vistas son utilizadas por la aplicación **Geoserver**, encargada de generar y servir los servicios interoperables, principalmente *WMS* y *WMTS*, que alimentan al visor (ver Figura 3.35). Además, han sido incorporados otros servicios procedentes de diferentes infraestructuras de datos espaciales (IDEs) que sirven de información de base y apoyo.

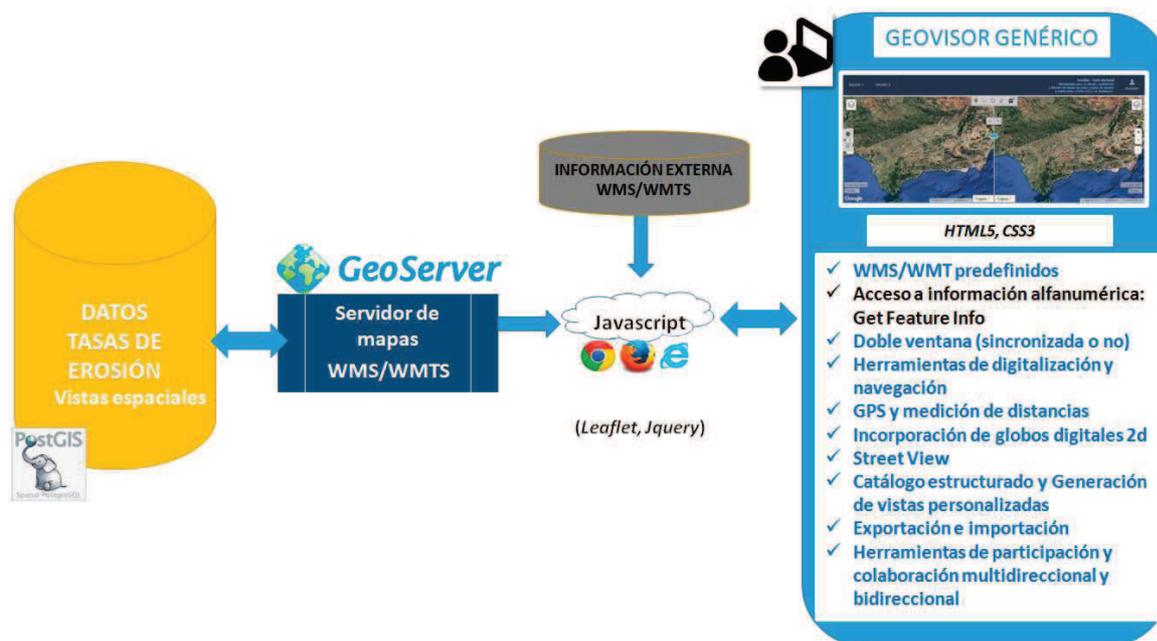


Figura 3.35. Funcionamiento y funcionalidades del prototipo del visor generalista.
Fuente: elaboración propia.

La presentación al usuario final se realiza mediante la utilización de la librería cartográfica de software libre **Leaflet**, que proporciona, gracias al uso intensivo de técnicas **Asynchronous JavaScript And XML (AJAX)** y **HyperText Markup Language (HTML5)**, un entorno de visualización cartográfica elegante e interactivo. La interfaz de usuario es accesible a través de la dirección: <http://www.visor.gis-and-coast.org/> y está compuesta por una página *HTML* única en la que se muestran los servicios *OGC* en dos ventanas de visualización y un menú replegable a la izquierda que contiene el catálogo que gestiona las capas (ver Figura 3.36).

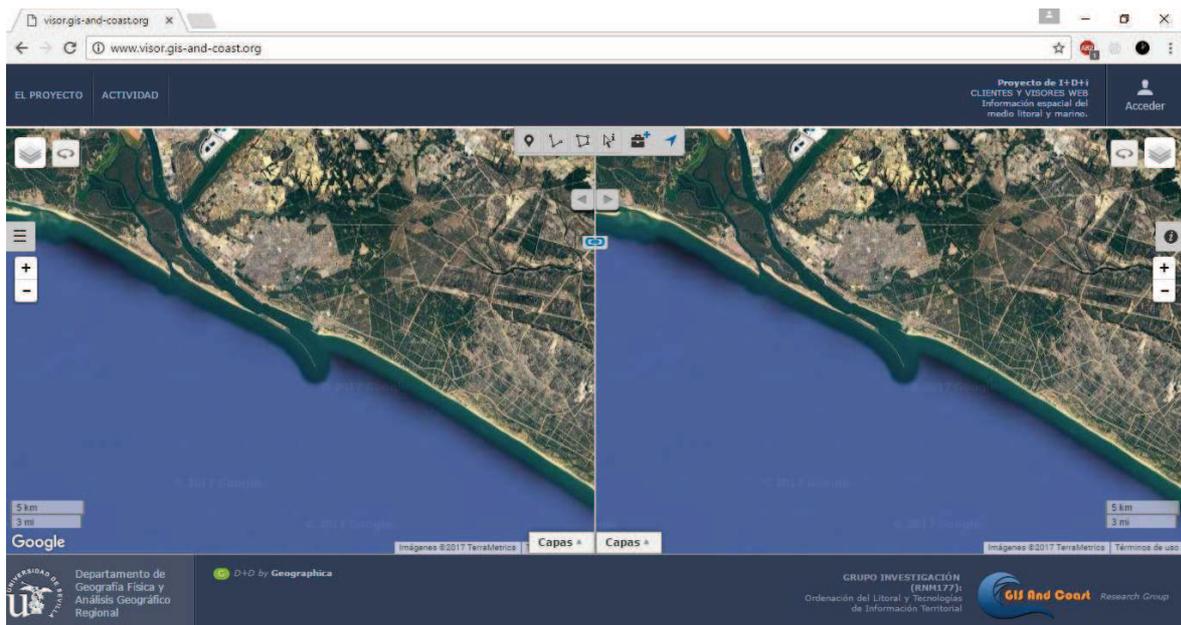


Figura 3.36. Interfaz del prototipo del visor *GIS and Coast*.
Fuente: elaboración propia.

Entre las aplicaciones y funcionalidades de este visor destacan las siguientes (ver Figura 3.37):

- ⇒ El área de estudio para el que fue diseñado se centra originalmente en la costa andaluza. No obstante, la incorporación en él de las capas procedentes de “globos digitales” (Butler, 2006) y sus representaciones en mapas 2-D (**Google Maps, Bing Maps y OpenStreetMap...**), así como el uso de la proyección Mercator (EPSG 3857), permite que podamos hablar de un visor global, teniendo la posibilidad de utilizar las capas anteriores como información geográfica de referencia.
- ⇒ Además de las herramientas de navegación propias de cualquier geovisor web (zoom, pan, etc.), el visor dispone de sencillas **herramientas vectoriales de digitalización** (puntos, líneas y polígonos) y otras destinadas a **marcar la localización (GPS) y medir distancias**.
- ⇒ Dispone de **2 ventanas de visualización** que permiten la opción de sincronización geométrica, ayudando al usuario final a consultar y comparar información de varias fechas o contenidos, incrementando de este modo su capacidad de análisis.
- ⇒ Dispone de un **catálogo estructurado**, así como la posibilidad de crear y almacenar **vistas personalizadas** con la información seleccionada y estructurada por el usuario. Dicha información se encuentra en el catálogo del

visor, donde se incluyen los *WMS* y *WMTS* generados junto a otras bases de referencia disponible en catálogos de IDEs o portales web externos. Una vez visualizadas, el usuario puede ordenar la lista de capas para su visualización, renombrarlas, establecer el nivel de transparencia que desee y almacenarlas en diferentes vistas para futuros accesos al visor.

⇒ Dispone, además, de herramientas de ayuda a la interpretación y análisis de las tasas de erosión, como son las representaciones 2-D de los globos digitales previamente mencionados, la implementación en el visor de un enlace a **Google Street View**, la posibilidad de consultar de manera automática la función **GetFeatureInfo** de los servicios o la posibilidad de **importar y exportar a KML**.

⇒ A todas estas funcionalidades se ha añadido otra vinculada a la posibilidad, por parte del usuario, de realizar (previo *login*) **comentarios con referencia espacial** sobre el ámbito seleccionado que, en tiempo real, se almacenan en una base de datos PostgreSQL/PostGIS que gestiona el visor y que permite una integración multidireccional con otros usuarios (Ojeda et al., 2013; Fernández et al., 2015).

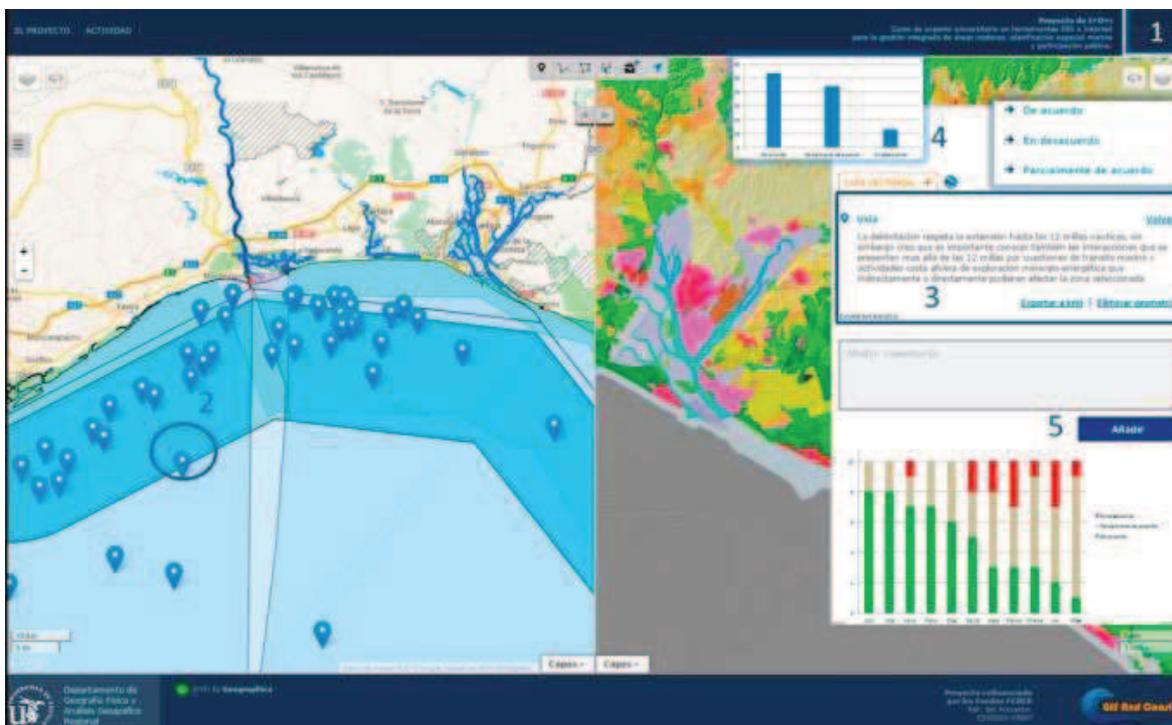


Figura 3.37. Funcionalidades y herramientas de participación bidireccional y multidireccional en el visor *GIS and Coast*.

Fuente: elaboración propia.

Esta forma de difusión constituye una buena manera de **suplir los inconvenientes de la difusión general de resultados, basada en la cartografía tradicional multiescalar**, imposible de utilizar en este trabajo de investigación por los motivos previamente comentados.

Junto con el geovisor comentado, se ha desarrollado y puesto a disposición una herramienta complementaria para usuarios más especializados, que necesitan de la visualización de las tasas de erosión para períodos y ámbitos espaciales específicos con criterios propios derivados de la información alfanumérica (modelo de datos).

3.6.3.- HERRAMIENTA PARA ESPECIALISTAS: CONSTRUCTOR DE FILTROS CQL

La herramienta para especialistas está compuesta por una página *HTML* única a la que es posible acceder a través del geovisor (botón de enlace) o de forma individualizada³⁴. En ella se muestra el mapa en la ventana principal de visualización y un menú replegable en la parte superior que contiene el constructor de filtros (ver Figura 3.38).

Esta herramienta permite la visualización, para **usuarios especializados**, de las tasas de erosión y otros indicadores resultantes, así como **la aplicación de niveles de incertidumbre personalizados a los datos**. La visualización y consulta puede realizarse para todas las escalas y para cualquier ámbito definido previamente por el usuario tanto **espacial** (municipios, provincias, etc.) como **temporal** (visualización de intervalos de tiempo).

Para su desarrollo se han utilizado un conjunto de librerías Javascript combinadas con OpenLayer, aprovechando la experiencia del Grupo de Investigación acumulada con el geovisor *Global Climate Monitor* (ver apartado 2.6.2).

³⁴ <http://viv3.cica.es/erosion>

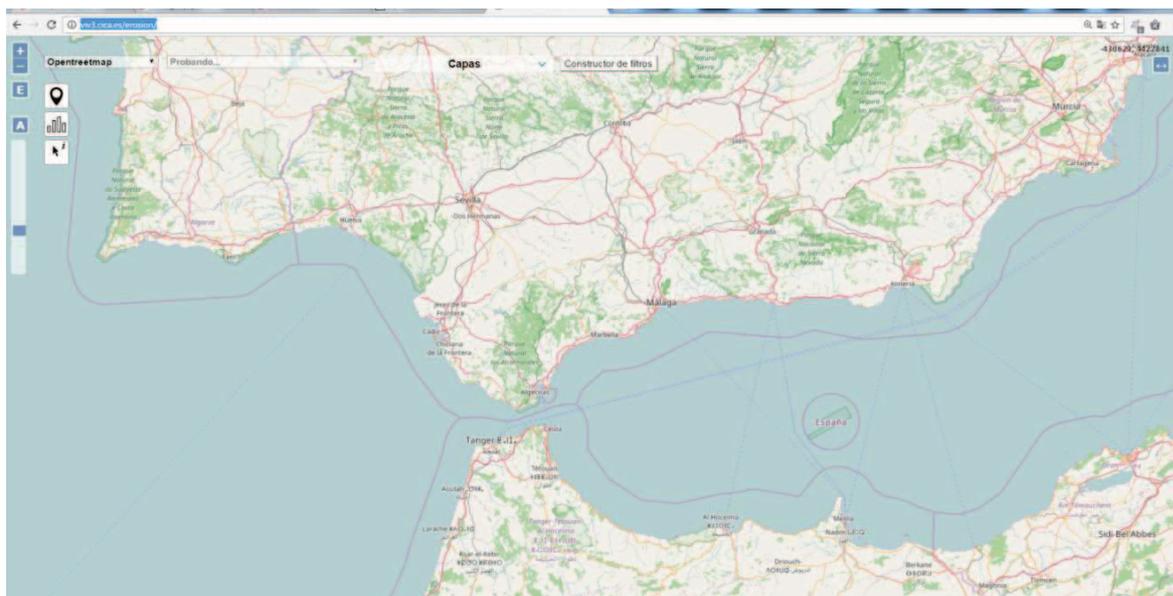


Figura 3.38. Interfaz de la herramienta para especialistas.
Fuente: elaboración propia.

Al igual que en el visor genérico, el esquema del funcionamiento de esta herramienta se fundamenta en 3 niveles, implementadas con diferentes softwares y componentes: los **datos**, las **aplicaciones** y la **presentación al usuario final** (ver Figura 3.39).

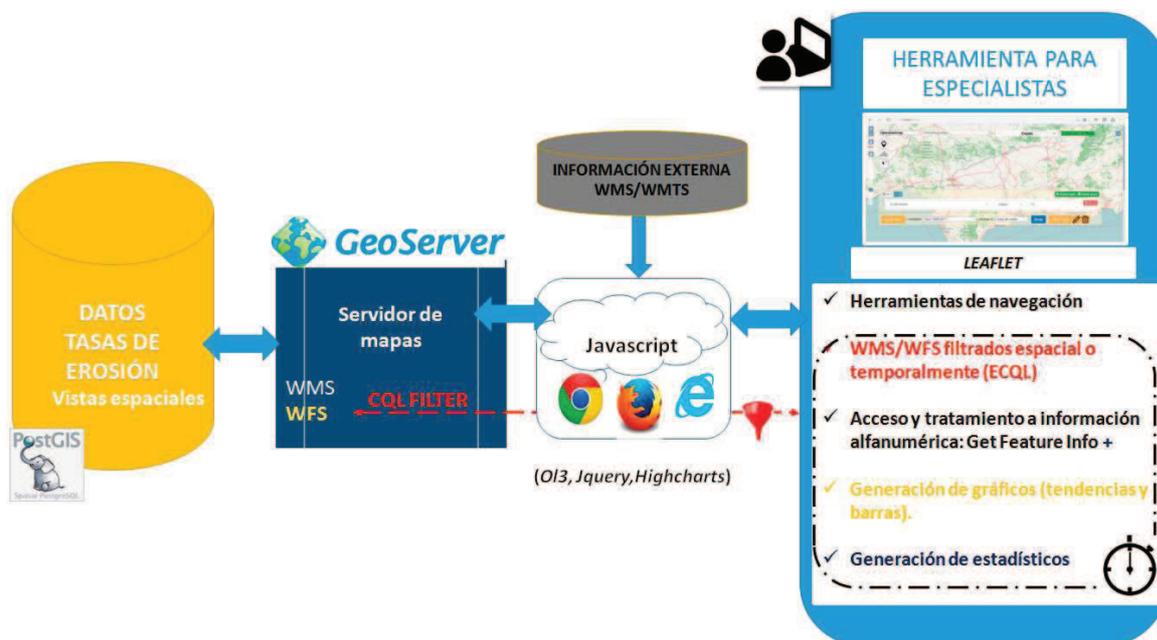


Figura 3.39. Funcionamiento y funcionalidades del prototipo de la herramienta para especialistas.
Fuente: elaboración propia

El **prototipo** de herramienta desarrollada tiene todas las funcionalidades de visualización y navegación del geovisor generalista pero presenta, además, 3 características novedosas de gran utilidad para usuarios especialistas (ver Figura 3.40):

- ⇒ La posibilidad de generar filtros espaciales o alfanuméricos en tiempo real sobre **servicios interoperables (WMS/WMTS servidos por Geoserver)**. De este modo, los usuarios especialistas pueden elegir la variable que deseen entre las mostradas en la interfaz de usuario, definir el ámbito espacial y el rango de la variable y generar en tiempo real **cartografía dinámica “a demanda” (on the fly)**, siendo el *GetFeatureInfo* el equivalente a una leyenda pormenorizada. Ello es posible gracias a la aplicación de un filtro de lenguaje **Extended Common Query Language (ECQL)**, a través de la implementación del *plugging CQL Filter* (no estándar, específico de Geoserver), que es capaz de transformar una petición del usuario en lenguaje *CQL* a través de un parseador. Así, *CQL Filter* permite la selección espacial o temporal de un subconjunto de la serie completa de datos para una variable determinada. Éstos son construidos dinámicamente a partir de los parámetros que el cliente define en los formularios de la página del visor, mediante funciones de *Javascript*.
- ⇒ La posibilidad de acceder y tratar la información alfanumérica a partir de la **generación de gráficos** de tendencias o barras en “tiempo real” bien para puntos individuales o para un conjunto de puntos seleccionados por el usuario. Ello es posible debido a la petición (mediante *Javascript*) de los datos temáticos a los servicios *WFS* generados, guardados como *CSV* para posteriormente representarlos a partir de la librería interactiva **Highcharts**.
- ⇒ **Generación de indicadores (estadísticos) en tiempo real** a partir de la utilización de las funcionalidades previamente comentadas. Los especialistas pueden demandar información sobre áreas muy específicas (un sector de una playa) o para selecciones concretas (playas con dunas, por ejemplo). Para facilitar su interpretación se generan los indicadores en tiempo real (tasas medias, retrocesos medios, porcentajes transectos erosivos...).

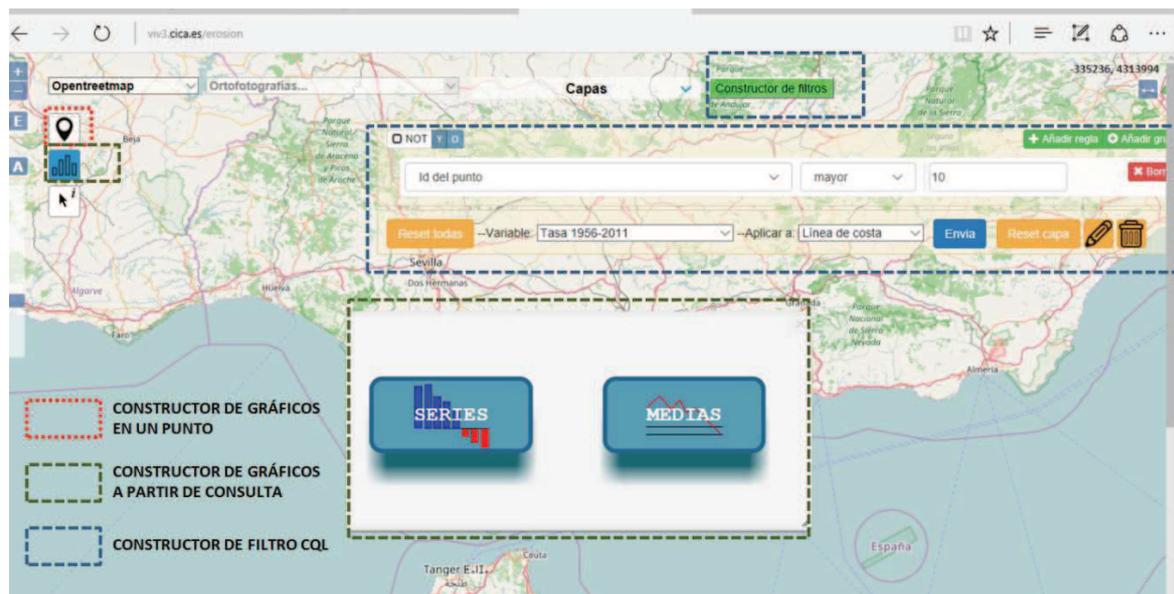


Figura 3.40. Funcionalidades de utilizadas para el usuario especializado.
Fuente: elaboración propia.

Además de constituir una gran herramienta para la difusión de resultados, las funcionalidades incorporadas al visor “Tasas de erosión” le proporcionan un destacado interés en los diferentes tipos de interacción que conllevan los proyectos colaborativos y la participación ciudadana. En este caso específico, el visor ha sido de gran ayuda y utilidad no sólo para la **visualización de resultados**, a tratar a lo largo del Capítulo 4, sino además para el **chequeo, control de calidad y la interpretación** de los mismos.

CAPÍTULO 4

Resultados



Peñón de Gibraltar (Gibraltar)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

La presentación de los resultados sigue la misma estructura definida para la exposición de los objetivos y de la metodología:

- ⇒ Se presenta como primer resultado la **estructura final de la base de datos espacial**, que constituye la principal aportación de esta Tesis. Incluye todos los datos de partida, los derivados del proceso de digitalización, los datos auxiliares necesarios para la aplicación de la metodología propuesta, los resultados del análisis evolutivo y los indicadores temáticos calculados.
- ⇒ Se presenta como segundo resultado los cálculos vinculados al **análisis e interpretación de las tasas de erosión**, incluyendo una valoración sintética y global del comportamiento evolutivo del litoral en la totalidad de la costa de Andalucía, así como la interpretación de las tasas de erosión de 2 Tramos representativos del litoral andaluz.
- ⇒ El tercer producto de este trabajo son los resultados de la **explotación conjunta de los datos de erosión y la información temática** que recoge el modelo de línea de costa para extraer un conjunto de índices e indicadores temáticos afines: playa útil como recurso turístico, indicador de susceptibilidad de las playas a los procesos erosivos, indicadores sintéticos por ámbitos espaciales, etc.
- ⇒ El cuarto y último resultado se deriva de la estrategia planteada para facilitar el **acceso visual a los datos** (semiología) **y su difusión por internet** (geovisor web), garantizando la reutilización y actualización de los mismos (servicios OGC).

4.1.- ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS ESPACIAL

El primer resultado y principal aportación de esta Tesis Doctoral se concreta en la implementación en un gestor de base de datos PostgreSQL/PostGIS del modelo de datos final que engloba la totalidad de las componentes geométrica y alfanumérica de los datos derivados de los procesos de fotointerpretación y levantamiento de líneas de costa, así como del cálculo y representación de tasas de erosión e indicadores temáticos (ver Figura 4.1).

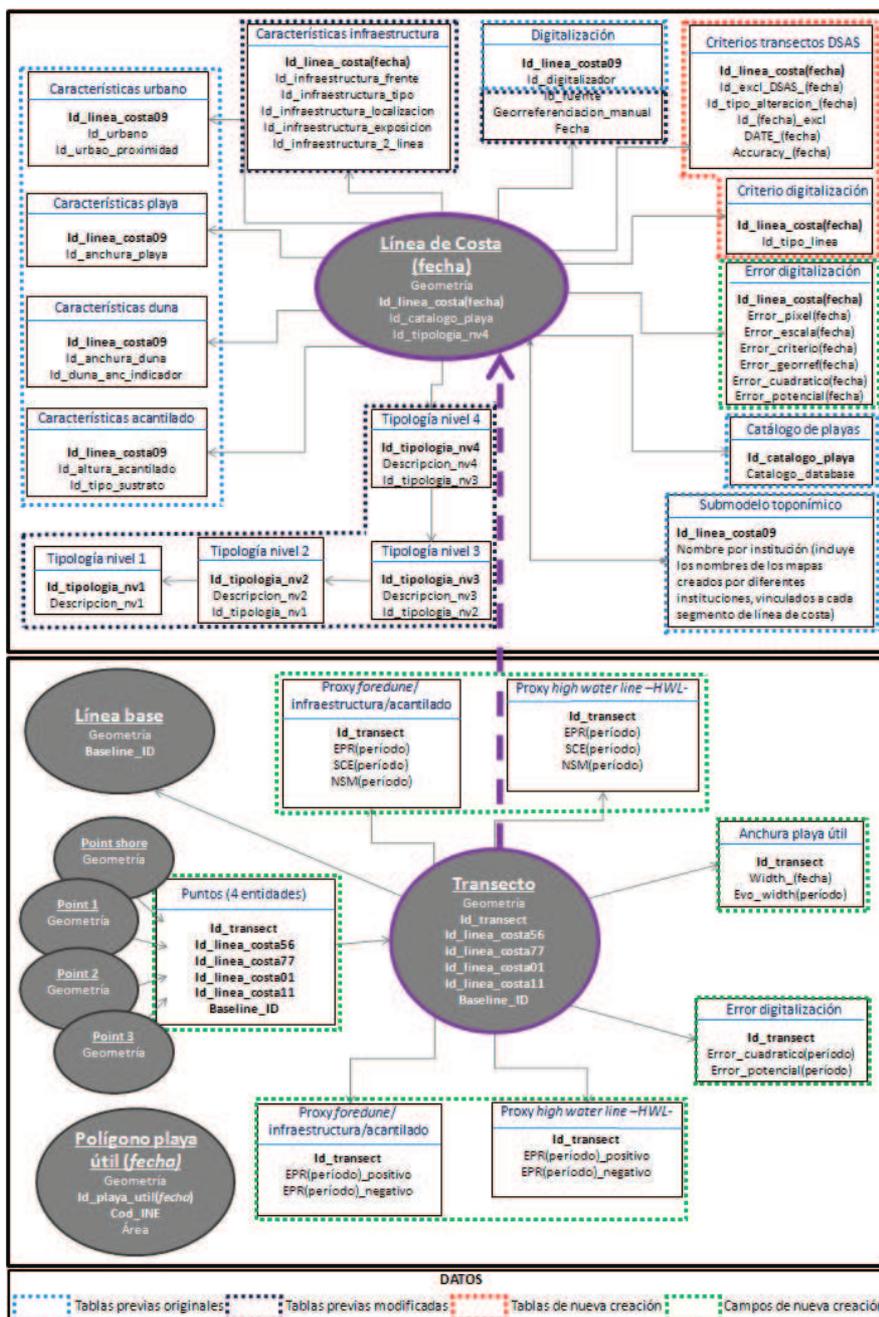


Figura 4.1. Esquema del modelo de datos final.

Fuente: elaboración propia.

4.1.1.- ESTRUCTURA Y RELACIONES DE LAS TABLAS DERIVADAS DE LA FOTOINTERPRETACIÓN Y LEVANTAMIENTO DE DATOS: LÍNEAS DE COSTA

De la implementación del modelo de datos de línea de costa utilizado en el proceso de digitalización, en la base de datos espacial resultan **8 tablas con información geométrica**, procedentes de la fotointerpretación de ambos *proxies* para cada fecha de estudio (1956, 1977, 2001 y 2011).

Cada tabla contiene la línea de costa fragmentada en **segmentos topológicamente independientes aunque unidos espacialmente**. Cada uno es identificado de manera unívoca mediante la clave primaria “Id_linea_costa(fecha)”, describiendo aquellos sectores del litoral con características naturales y antrópicas comunes. Por ello, los cambios producidos en el frente costero en cualquiera de las tablas con las que se encuentra relacionado (muy común durante el proceso de desactualización), conllevará la subdivisión topológica del segmento (ver Figura 4.2).

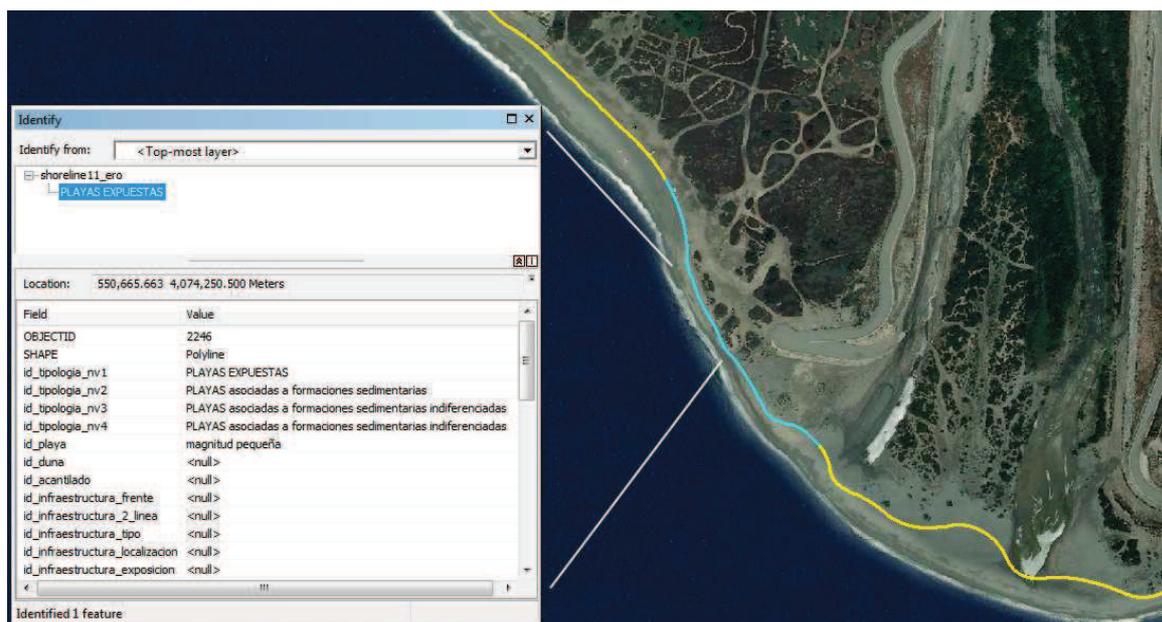


Figura 4.2. Segmento de línea de costa de 2011 según el *proxy backshore/foredune* en la desembocadura del río Andarax (Almería).
Fuente: elaboración propia.

En este sentido, la desigual configuración de las características naturales y antrópicas de cada una de las líneas de costa de cada fecha de estudio determinará el número total de segmentos de cada una de ellas (ver Tabla 4.1).

Línea de costa	1956-1957	1977-1983	2001-2003	2010-2011
Número de segmentos	2.401	3.434	4.266	4.326

Tabla 4.1. Número de segmentos de línea de costa corta para ambos *proxies* de cada fecha de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Como ya se detalló en el Capítulo 3, el **modelo de datos de línea de costa** es el resultado de la **modificación y ampliación** de un modelo previo, cuyo elemento geométrico básico es cada segmento topológico independiente, caracterizado por una clave primaria (Id_linea_costa(fecha)) relacionada alfanuméricamente con una serie de tablas y campos de gran importancia para la caracterización del frente costero (ver Figura 4.3). La información alfanumérica del modelo de datos se organiza en un conjunto de tablas originales junto a otras modificadas o de nueva creación:

⇒ **Tablas previas no modificadas correspondientes a 2009 y actualizadas exclusivamente a 2011:**

- Características acantilado: identifica cualitativamente los acantilados en función a su altura y al tipo de sustrato que lo compone.
- Características playa: caracteriza cualitativamente la anchura de la playa.
- Características duna: describe la anchura del cuerpo dunar tanto de forma cualitativa como cuantitativa.
- Características urbano: identifica las particularidades la componente urbana presente en tramos antropizados, tales como el nivel de aglomeración o la proximidad de ésta al frente costero.
- Digitalización: especifica variables de notoria importancia durante el proceso de fotointerpretación y digitalización, tales como la fuente de datos utilizada, año de la misma, digitalizador o necesidad de referenciación espacial adicional.
- Catálogo playas: muestra los enlaces de cada playa (toponímicamente definida) con su homónima en la Guía de Playas del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). Ha sido generada a través de datos externos.
- Submodelo toponímico: procedente de datos externos, identifica toponímicamente cada segmento de línea de costa en base a los documentos cartográficos oficiales de referencia, siendo de gran utilidad para la conexión con el enlace de la Guía de Playas antes descrita.

⇒ **Tablas previas de 2009 modificadas para cada fecha de estudio:**

- Tipología jerárquica: desagrega la tipología costera en 4 niveles jerárquicos.
- Características infraestructura: describe una serie de campos que permiten una identificación completa de la misma, tales como localización en primera o segunda línea de playa, nivel de inundación, exposición al oleaje, etc.

⇒ **Tablas/campos de nueva creación para cada fecha de estudio:**

- Criterio digitalización: clasifica la pertenencia de los segmentos de cada línea en base a los conceptos de línea de costa corta/larga y *proxymy* utilizado.
- Criterio transectos *DSAS*: caracteriza cada segmento de línea de costa en función de una serie de campos que permiten decidir la inclusión/exclusión de segmentos de línea de costa para el cálculo de tasas (herramienta *DSAS*). En esta tabla se contempla la fecha (con precisión diaria) de la fuente de datos, la precisión de la línea de costa, los tramos incluidos/excluidos en el análisis postcálculo, tipo de alteración del frente costero, etc.
- Error digitalización: se cuantifican la totalidad de variables contempladas en la asignación de los errores cuadrático y potencial de cada línea de costa.

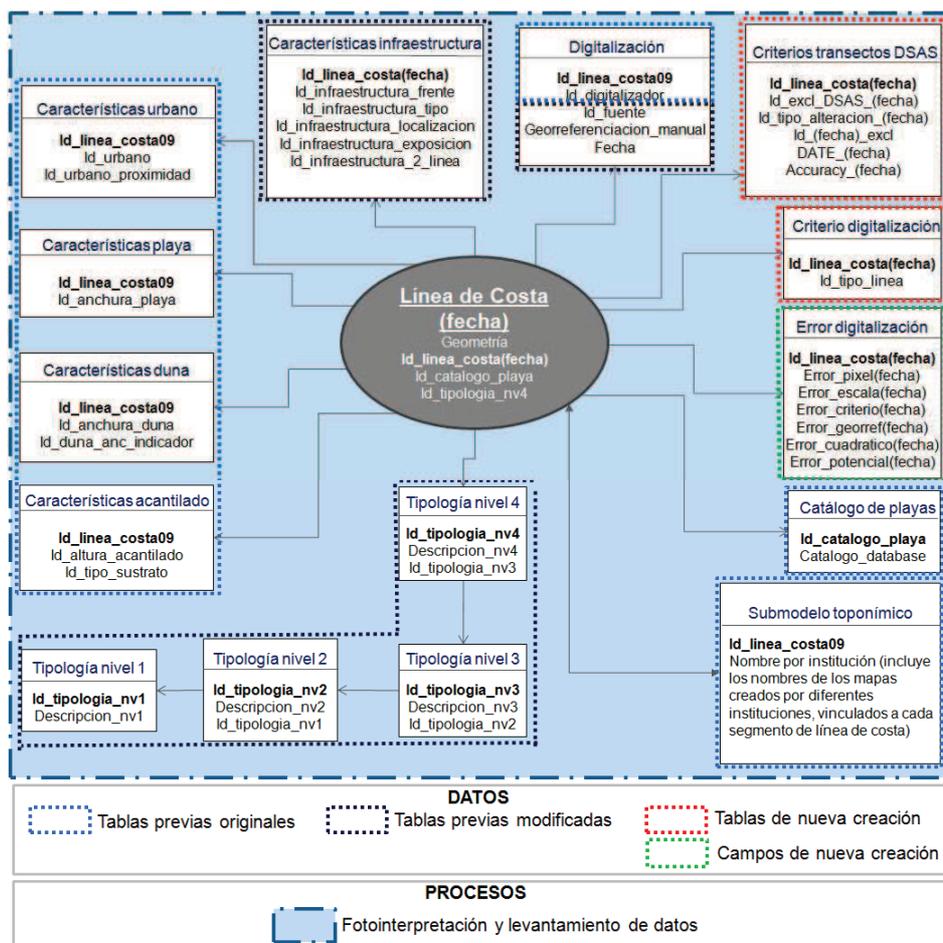


Figura 4.3. Resultado del modelo de datos de línea de costa.
Fuente: elaboración propia.

4.1.2.- ESTRUCTURA, ENTIDADES, TABLAS Y RELACIONES DERIVADAS DEL CÁLCULO DE TASAS Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA: TRANSECTOS

El proceso de cálculo de tasas y representación de resultados sigue 2 pautas que, aunque claramente diferenciadas, comparten información alfanumérica, lo que explica su inclusión dentro del mismo apartado. De este modo, se diferencian **2 tipos de entidades y tablas**, unas derivadas del análisis y **cálculo de tasas** y otras generadas para la **representación gráfica de los resultados** (ver Figura 4.4).

4.1.2.1.- ESTRUCTURA, ENTIDADES, TABLAS Y RELACIONES DERIVADAS DEL CÁLCULO Y ANÁLISIS DE TASAS

El cálculo de tasas ha sido posible gracias a la generación de 2 tablas con componente geométrica: **línea base y transectos**. La **línea base** consta de **una única tabla con geometría**, cuya función primordial es servir de punto de inicio a los transectos posteriormente generados. Además de la propia relación espacial que la une a los transectos, se la ha dotado de un identificador unívoco (*baseline_ID*) correspondiente a las discontinuidades espaciales de la costa, sirviendo como división de los diferentes comportamientos evolutivos existentes en ambos márgenes de las mismas de gran interés para generalizar los resultados mediante medias móviles. Los **transectos**, por su parte, conforman la tabla geométrica por excelencia del proceso de cálculo de datos. Generados automáticamente mediante la herramienta *DSAS*, está compuesta por **15.069 transectos** identificados de forma correlativa y unívoca mediante la clave primaria "Id_transect". Esta clave adquiere un interés primordial para la relación entre la entidad geométrica y los datos alfanuméricos obtenidos del cálculo de tasas e indicadores derivados.

Las particularidades geométricas de la tabla de transectos, ortogonales a las líneas de costa previamente generadas, permite:

- ⇒ Cálculo de tasas para todos los períodos temporales contemplados en la Tesis.
- ⇒ Incorporación a los mismos, mediante intersección espacial, de la información alfanumérica procedente del modelo de datos de línea de costa.

Así, se han obtenido 3 conjuntos de campos según el *proxy* utilizado:

- ⇒ *Proxy backshore/foredune*: presenta el cálculo conjunto de tasas de cambio anual (*EPR*) y de distancias absolutas (*SCE* y *SNM*) para el período global 1956-2011 y subperíodos 1956-1977, 1977-2001, 1977-2011 y 2001-2011, relacionadas con la tabla geométrica de transectos mediante la clave primaria "Id_transect".
- ⇒ *Proxy HWL*: presenta el mismo cálculo anteriormente citado para los períodos temporales estudiados, calculados según el criterio de marca húmeda.
- ⇒ Anchura playa útil: contemplado como un tercer *proxy* resultado del análisis conjunto de los *proxies* anteriores, cuantifica la anchura lineal de la playa útil para cada fecha de estudio, recogidas todas en la misma entidad de transectos mediante la clave primaria "Id_transect". La disponibilidad de datos para la

totalidad de fechas individualizadas permite el cálculo de la evolución de la anchura de la playa útil por períodos, contemplada en este conjunto.

Siguiendo una estrategia de cara a su representación semiológica, se han generado 2 conjuntos de campos adicionales, que contienen los resultados de las tasas de cambio anuales (*EPR*) divididas según el signo, obteniéndose:

- ⇒ *Proxy backshore/foredune*: presenta exclusivamente el cálculo de tasas de cambio anual (*EPR*) para el período global 1956-2011 y subperíodos 1956-1977, 1977-2001, 1977-2011 y 2001-2011, divididas según su signo y expresadas en valores absolutos. Al igual que los conjuntos anteriores, se encuentra relacionado con la tabla geométrica de transectos mediante la clave primaria "Id_transect".
- ⇒ *Proxy HWL*: presenta el mismo cálculo anteriormente citado para los períodos temporales estudiados, calculados según el criterio de marca húmeda.

La integración de la totalidad de tablas alfanuméricas de línea de costa y cálculo de tasas gracias a la intersección espacial de los transectos con las mismas, hace posible la generación de conjuntos de tablas, resultados de la comparación temporal de determinados fenómenos o variables. Este es el caso de los errores cuadráticos y potenciales procedentes de la digitalización de las líneas de costa, calculados ahora para cada período.

De forma independiente a la estructura antes comentada, mediante el uso conjunto de ambos *proxies* de cada línea de costa, se han generado **5 tablas geométricas de carácter poligonal** (una para cada línea) que recogen el resultado del **cálculo superficial de playa útil**, de gran importancia para la generación y explotación de indicadores temáticos. El uso de datos externos al modelo de datos ha permitido vincular las mismas a la división administrativa municipal procedente del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA) mediante la clave "Cod_INE".

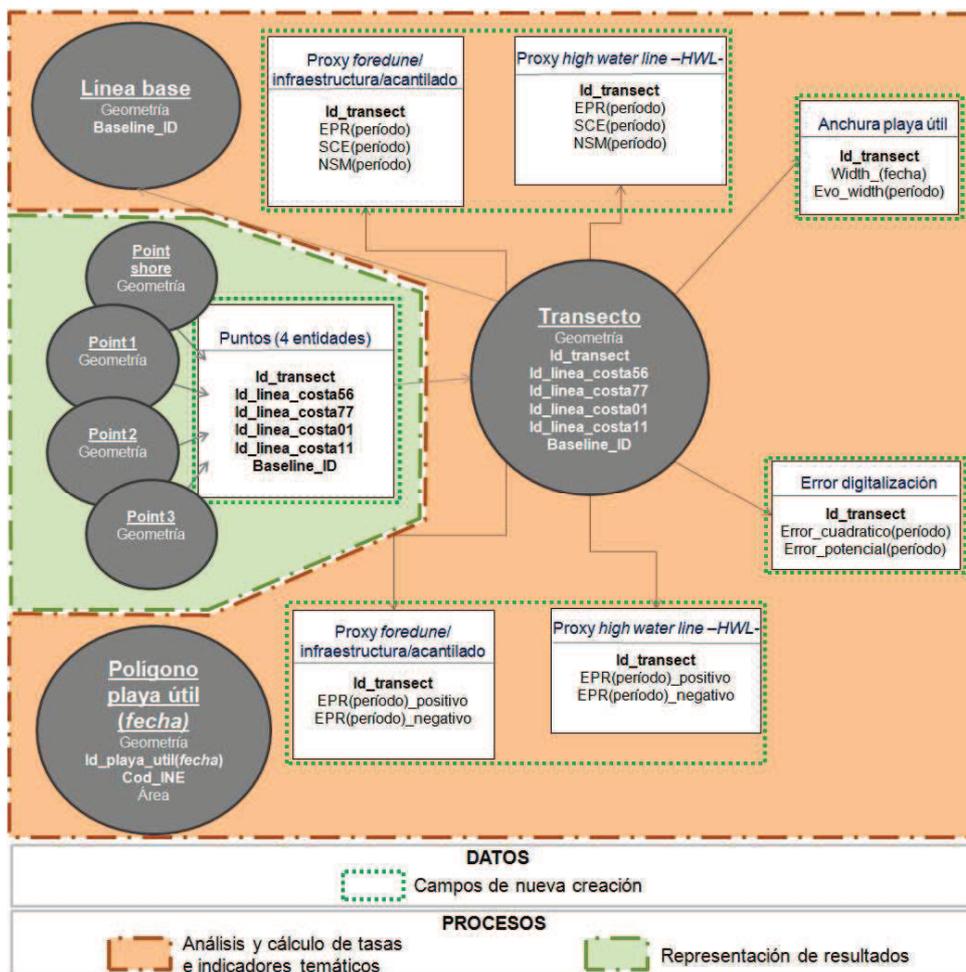


Figura 4.4. Resultado del modelo de datos del cálculo de tasas y representación.
Fuente: elaboración propia.

4.1.2.2.- ESTRUCTURA, ENTIDADES, TABLAS Y RELACIONES GENERADAS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS

Por otra parte, la creación de tablas destinadas a facilitar la representación de los resultados deriva de la imposibilidad de plasmación cartográfica de los mismos mediante la tabla geométrica de transectos. Y es que el rol de los transectos, como ya se comentó anteriormente, ha superado su función original como herramienta de cuantificación, adoptando un papel clave en el traspaso de información alfanumérica entre las propias tasas calculadas y el modelo de datos de línea de costa mediante intersección espacial. Dicha relación topológica permite unir los datos de la totalidad de las líneas de costa y cálculo de tasas en una única entidad geométrica (transectos), regida por la clave primaria "Id_transect". No obstante, para la representación semiológica de las tasas es más eficiente una representación a través de puntos proporcionales, comentada en el apartado 3.5.1.

Por ello, y de cara a la representación de los resultados, se ha procedido al volcado bruto de información alfanumérica contenida en la tabla de transectos procedente del modelo de datos a **4 tablas geométricas puntuales** de nueva creación (ver Figura 4.4). Estas 4 tablas son el resultado de la intersección de éstos con la línea de costa de 2011 y con 3 entidades geométricas lineales *offshore* paralelas a la misma y generadas a partir de áreas de influencia (a 450, 800 y 1.150 m. de la costa, respectivamente), igualmente regidas mediante la clave primaria "Id_transect". Estas tablas serán la base de la mayor parte de los servicios OGC creados para la representación gráfica y cartográfica de los resultados.

4.2.- RESULTADOS VINCULADOS AL ANÁLISIS DE LAS TASAS DE EROSIÓN

4.2.1.- SOBRE LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

La **extensión y diversidad de resultados** obtenidos sobre tasas de erosión en esta Tesis Doctoral (tasas de erosión calculadas para toda la amplitud de la costa andaluza, para diferentes períodos, a escala muy detallada, transectos de 50 m., etc.) hacen inviable la presentación pormenorizada de estos en formato convencional sobre papel. Es por ello que entre los objetivos planteados en esta Tesis Doctoral se encuentra el diseño y desarrollo de un **geovisor web** (ver apartado 3.6), único elemento capaz de ofrecer al lector la posibilidad de visualizar de forma interactiva estos datos y resultados a todas las escalas. En el caso de las tasas de erosión, el lector podrá acceder a través de este geovisor a los siguientes resultados:

- ⇒ Representación gráfica y cartográfica multiescalar de todas las tasas calculadas.
- ⇒ Acceso a través de la herramienta “*GetFeatureInfo*” de todos los datos para cada uno de puntos.
- ⇒ Acceso a través de los servicios de descarga de documentos del visor a toda la información para cada Tramo (*pdf*).
- ⇒ Incorporación de una herramienta de consulta interactiva para expertos:
 - Búsqueda, selección y muestra de información mediante *Common Query Language (CQL)*.
 - Gráficos de tendencias y barras.
 - Gráficos de tasas por tramos seleccionables con variables alfanuméricas y espaciales.

Junto a esta pormenorizada representación cartográfica de los resultados a través del geovisor web, se ha decidido incluir en el texto de esta Tesis:

- ⇒ Una **valoración sintética y global de las tasas para toda la costa de Andalucía.**
- ⇒ Una **interpretación y análisis más detallado de las tasas de erosión para 2 Tramos representativos del litoral andaluz**, teniendo en cuenta una serie de consideraciones a nivel espacial y temporal.

Destaca entre ellas aquella derivada de que la interpretación de las tasas de erosión calculadas a partir de *proxies* es una tarea bastante compleja, hecho que ya ha

sido puesto de manifiesto en varias publicaciones (Ojeda, 2000; Boak y Turner, 2005; Guariglia et al., 2006; Fernández et al., 2015). Ello se debe a la simplificación como fenómeno superficial de un proceso volumétrico (pérdida de volumen sedimentario en la playa) y a la complejidad de factores naturales que intervienen (cambios en el régimen precipitaciones en cuencas, en el clima marítimo del oleaje y en el nivel relativo y medio del mar) -ver apartado 2.2-. A todo ello se suma el efecto de abundantes alteraciones antrópicas (a los aportes, al tránsito longitudinal, al ajuste de perfiles transversales, etc.), necesarias para su adecuada interpretación. Dado que el objetivo de esta Tesis es establecer una metodología para el cálculo y difusión de las tasas de erosión, la interpretación de las mismas para una costa de la magnitud de la andaluza resulta inviable para todas las tasas calculadas a escala de detalle. Por ello, siendo este aspecto una segunda derivada del objetivo central de la Tesis se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

⇒ **Restricción del ámbito a nivel espacial:** si bien la unidad básica para la presentación e interpretación de las tasas de erosión ha de ser las **Unidades Fisiográficas** conectadas desde la perspectiva sedimentaria (se han definido 22 unidades descritas en el Capítulo 1), la presentación e interpretación de las tasas en cada período y para cada una de ellas conllevaría el comentario de una gran cantidad de mapas a diversas escalas, cuyo volumen sería inabarcable en una Tesis Doctoral, derivando en una pesada e ineficiente descripción de la interpretación de éstas. Es por ello que, en este Capítulo, se ha adoptado la decisión de realizar los comentarios por **Tramos costeros más amplios**, cuyos límites lo son a su vez de las Unidades Fisiográficas sedimentarias, garantizándose de este modo la coherencia desde la perspectiva dinámica.

De este modo, ya se delimitaron en el Capítulo 1 un total de **6 Tramos** para toda la costa andaluza (ver Figura 4.5), cuyos resultados (totalidad de tasas y períodos) pueden consultarse en el visor, donde se han estructurado 6 proyectos (uno para cada Tramo). De ellos, al igual que ocurre con las Unidades Fisiográficas (elevado número de tasas asociados a diferentes períodos y escalas que harían inviable su descripción e interpretación en los límites formales de una Tesis), se han seleccionado para su comentario e incorporación al documento escrito de esta Tesis los resultados los **Tramos 1 y 5**, sobre los cuales se realizará un análisis más pormenorizado de las tasas de erosión. Se ha procurado una selección representativa de los mismos, que

muestre la diversidad de situaciones que puede encontrarse en la evolución de la costa andaluza y de los factores que controlan los procesos erosivos de la misma (fuentes de sedimentos, importancia de las derivas longitudinales, importancia de las alteraciones antrópicas a la dinámica longitudinal y transversal de las playas). En este sentido los Tramos seleccionados son:

- **Tramo 1 (río Guadiana-puerto de Chipiona):** Este Tramo, claramente representativo de las playas atlánticas andaluzas, funcionaba, previo a las históricas alteraciones antrópicas, como una única playa interconectada por la deriva litoral que abarcaba desde el río Guadalquivir hasta el río Guadiana, e incluso más allá de éste, extendiéndose por las formaciones arenosas del complejo de islas barrera del sur de Portugal (ría de Formosa). Está controlado por una potente deriva litoral y se caracteriza por la presencia islas barreras evolucionadas, flechas y contraflechas litorales, que cerraron antiguas bahías para favorecer el desarrollo de marismas mareales asociadas a estuarios, así como por el desarrollo de acantilados sobre rocas muy deleznable (por ejemplo, el acantilado del Asperillo). Todo ello le proporcionan una especial singularidad y lo convierten en representativo de las playas de una costa mesomareal abierta al oleaje del Océano Atlántico.
- **Tramo 5 (Castell de Ferro-Cabo de Gata):** Este Tramo, en cambio, es representativo de muchas playas del frente mediterráneo, generalmente asociadas a Unidades Fisiográficas sedimentarias de pequeña entidad, individualizadas por sectores acantilados de rocas coherentes (calizas, esquistos...) y alimentadas por una red hidrográfica con un funcionamiento hidrológico muy irregular (ramblas) asociada a pequeñas cuencas fluviales de gran pendiente media que, finalmente, alimentan a las playas con grandes volúmenes de sedimentos en cortos períodos de tiempo. El desarrollo de deltas alimentados por estos sedimentos, la presencia de complejas formaciones arenosas (Campo de Dalías) y de albuferas, así como el predominio de un régimen micromareal asociado a un oleaje con menos *fetch* le proporcionan igualmente una alta representatividad y un carácter complementario con el Tramo anterior.

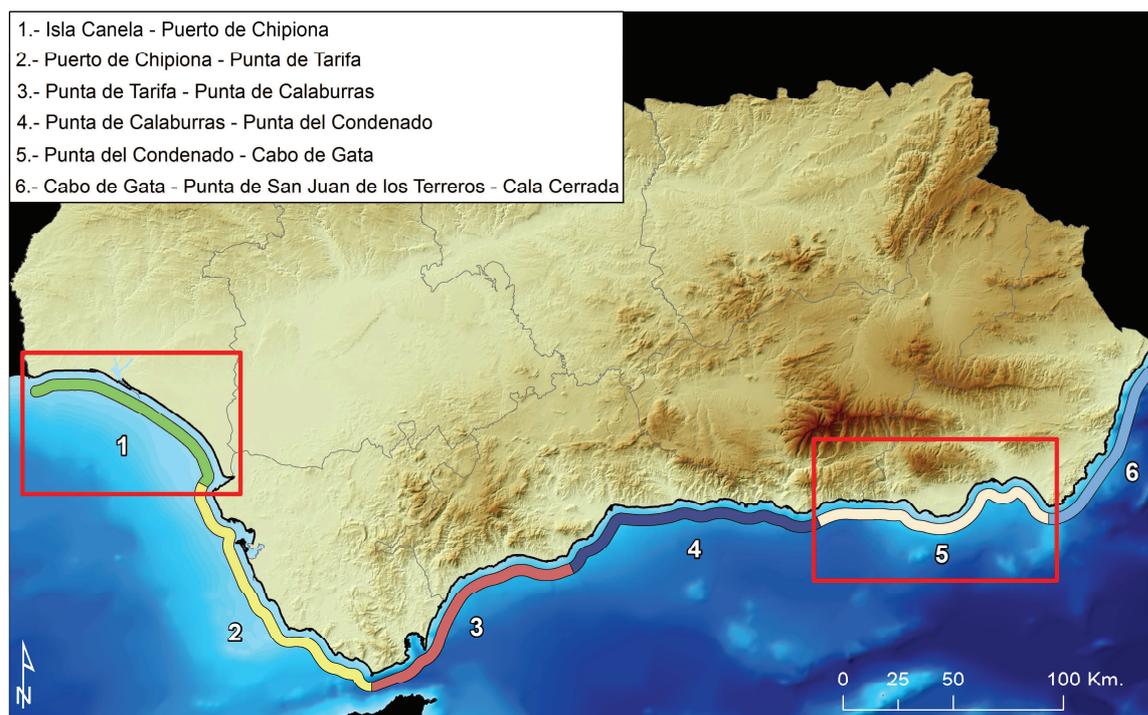


Figura 4.5. Delimitación de los Tramos de estudio para la costa andaluza.
Fuente: elaboración propia.

⇒ **Restricción del ámbito a nivel temporal**, si bien todas las tasas y períodos reflejados en el modelo de datos han sido calculados para la totalidad de la costa andaluza y están disponibles para todos los puntos equidistantes a 50 m. (ver geovisor web), con el fin de hacer un comentario más eficiente, se han seleccionado los siguientes períodos:

- Período **1977-2011 para el análisis detallado a medio-largo plazo**. La selección de este período se debe, tal y como se expresa en el apartado 3.4.1.3, a la consideración de éste como el período más fiable en términos de calidad visual y geométrica de las fuentes de datos, dada la deficiente calidad geométrica y radiométrica del Vuelo Americano de 1956, ya mencionada en el Capítulo 3 de esta Tesis. Este período es posteriormente completado, de forma sintética, con comentarios relativos a sus diferencias en relación a otros períodos:
 - Período **1956-1977**, previo a la intensificación del uso antrópico de las playas andaluzas. Se realiza una interpretación más simplificada, intentando resaltar exclusivamente los aspectos diferenciadores del intervalo anterior que puedan ser constatados con garantías a pesar de la escasa calidad geométrica y radiométrica de la Ortofotografía de 1956.

- Período **2001-2011**, elección justificada no sólo por el gran interés debido a la intensificación antrópica producida durante estos años en el litoral andaluz (Villar, 2011) sino además, porque podría matizar las tasas generales del intervalo 1977-2011 al incorporar, de forma independiente, el último período de 10 años donde se ha producido un cambio de actitud en la estrategia seguida por el Ministerio competente tras la publicación de la *Ley 22/1988, de 28 de julio, de costas* (deslindes incorporando dunas, medidas correctoras blandas, etc.).
- ⇒ Se ha optado por la **presentación de los cálculos con los valores originales** que proporcionaba el sistema utilizado (*DSAS*) en los mapas y el visor web desarrollado, **sin incorporar las correcciones de los potenciales errores** (calculados para cada fecha y período). Esta decisión queda justificada porque su aplicación supondría la obtención de valores finales de las tasas de erosión, quedando siempre dudas respecto a la idoneidad de los umbrales. Para evitar este hecho se ha optado por conjugar la presentación de ambos valores:
- En los mapas se representan los valores originales del cálculo sobre las líneas digitalizadas, pero en los gráficos de síntesis en este texto se especifica el porcentaje de los valores que estarían dentro del margen de error del cálculo.
 - En el visor web se ofrecen, adicionalmente, 2 posibilidades para interpretar correctamente las tasas:
 - Accediendo, interactivamente, a los valores originales y el margen de error para cada punto/transecto de cálculo según las ortofotografías utilizadas (*GetFeatureInfo*).
 - Utilizando la herramienta de consulta interactiva para especialistas, que posibilita la realización de filtros sobre los valores originales, haciendo posible aplicar directamente los márgenes de error a demanda como filtros. Con ello se posibilita la visualización cartográfica de las tasas de erosión con los valores de error calculados, o con otro valor seleccionado a demanda por el usuario.
- ⇒ De igual forma, se ha optado por el **análisis e interpretación de las tasas** con el *proxy* más eficiente para la evolución a largo/medio plazo, es decir, el

contacto **backshoreforedune, vegetación, acantilado o infraestructura**. Este *proxy*, siendo el recomendado por la bibliografía específica, al aislarlo del continuo ajuste del perfil transversal por la incidencia del oleaje y mareas, **no registraría erosión en áreas donde el retroceso esté impedido** por la presencia de acantilados o, sobre todo, de infraestructuras antrópicas. A pesar de ello, dada la variabilidad de los perfiles transversales de las playas en nuestra región por su clara estacionalidad -con ortofotografías que incluyen fotografías de varias fechas y estaciones- y la presencia de un amplio conjunto de playas atlánticas con elevados rangos mareales -costa mesomareal-, consideramos que este es el *proxy* más consistente con los objetivos de la Tesis. Sin embargo, dado que también se dispone de la digitalización de la línea utilizando el *proxy* de la “última marca húmeda de la marea alta” **-HWL-** (ver apartado 3.2.1), se ha procedido al cálculo de las tasas de erosión utilizando éste. Estas tasas estarán disponibles en el **geovisor**, permitiendo al usuario la comparación directa de las tasas de erosión calculadas con ambos *proxies*.

Por tanto, **la valoración y análisis de los resultados de las tasas de erosión de esta Tesis Doctoral** se han estructurado del siguiente modo:

⇒ Para **toda la costa de Andalucía**:

- Se procede a la **valoración de las tasas de erosión**, prestando especial atención al número de transectos que presentan tasas positivas y negativas, así como a la superficie acumulada o erosionada para el período **1977-2011**.
- Posteriormente, se comenta sus principales **diferencias** con respecto al intervalo histórico **1956-1977** y con la evolución reciente (período **2001-2011**).

⇒ Para **cada uno de los Tramos seleccionados**:

- En primer lugar, se presenta una **descripción de los límites, la evolución geomorfológica y el balance sedimentario** de cada Tramo.
- En segundo lugar, se detallan las principales **alteraciones antrópicas** que suponen una profunda modificación de las características vinculadas a la dinámica de las playas.
- En tercer lugar, se procede al **análisis e interpretación de las tasas de erosión**, prestando especial atención a la calidad geométrica y

radiométrica de las fuentes utilizadas y sus características, así como a la presentación, para el período 1977-2011, de los sectores erosivos y regresivos en el Tramo de análisis. Por último, se comentan sus principales diferencias con respecto al período histórico (1956-1977) y a la evolución reciente (período 2001-2011).

4.2.2. PRESENTACIÓN Y VALORACIÓN GLOBAL DE LAS TASAS DE EROSIÓN PARA LA COSTA DE ANDALUCÍA

4.2.2.1. PERÍODO DE REFERENCIA 1977-2011

NÚMERO DE “TRANSECTOS” CON TASAS POSITIVAS Y NEGATIVAS PARA EL PERÍODO DE REFERENCIA (1977-2011)

La Figura 4.6 representa los transectos (puntos en el mapa) que poseen un comportamiento positivo y negativo para el período de referencia (1977-2011) en todas las playas de Andalucía. Además de lo anterior, puede apreciarse la distribución espacial y la intensidad de las tasas para totalidad de los 6 Tramos que componen la costa de Andalucía. De esta información se pueden extraer las siguientes consideraciones para este intervalo:

- ⇒ **Predominio de los transectos regresivos**, los cuales suponen el **42%** del total de los transectos asociados a playas expuestas en la costa Andalucía. De ellos, un 13% presentan tasas negativas dentro del margen de incertidumbre derivado del proceso de digitalización (tamaño del píxel y error de digitalización en función de la escala). La presencia de infraestructuras en el frente de playa evitan que las tasas erosivas sean aún mayores (8% de los transectos con erosión están limitados por *proxy*). Las tasas erosivas son más frecuentes en el sector mediterráneo (Tramos 3, 4 y 5, especialmente –ver Figura 4.5-) que en el atlántico. Ello se debe a la presencia de cuencas reguladas, la multitud de obras de ingeniería y la extensa ocupación antrópica de las dunas y playas en este ámbito. Del mismo modo, parte importante de las tasas de erosión registradas en el frente atlántico se vinculan al efecto de infraestructuras (diques del río Guadiana, desembocadura del río Tinto-Odiel, Bajos de la Cabezuela, etc.)

- ⇒ **Alta frecuencia de los transectos positivos** que representan el **32%**, incluyendo un 10% dentro del margen de incertidumbre del método (tamaño del píxel y error de digitalización en función de la escala). La mayor frecuencia e intensidad de los tramos positivos se registran en el sector atlántico (Tramos 1 y 2), vinculados en su mayor parte a la presencia de infraestructuras que alteran la importante deriva litoral hacia levante (diques de los ríos Guadiana, Carreras, Tinto-Odiel, Guadalete y Barbate, así como a aquellas zonas donde la dinámica litoral hace progradar los extremos distales de las flechas litorales (Rompiado, Malandar...) en la provincia de Huelva, generalmente alimentadas por los sectores regresivos. En el frente mediterráneo las infraestructuras que interrumpen la dinámica longitudinal también tienen un efecto sobre las tasas positivas (puertos, diques, etc.), muy generalizadas a lo largo de todo el ámbito.
- ⇒ Finalmente, un **26% de tramos** representan un comportamiento **estable**, aunque en un 11% de ellos, este comportamiento estable es “forzado”, ya que la presencia de infraestructuras en cualquiera de las fechas (paseos marítimos, muros de defensa, escolleras...) impide evaluar los procesos erosivos por el retroceso impedido debido al *proxy* utilizado (contacto playa alta/duna o infraestructura).

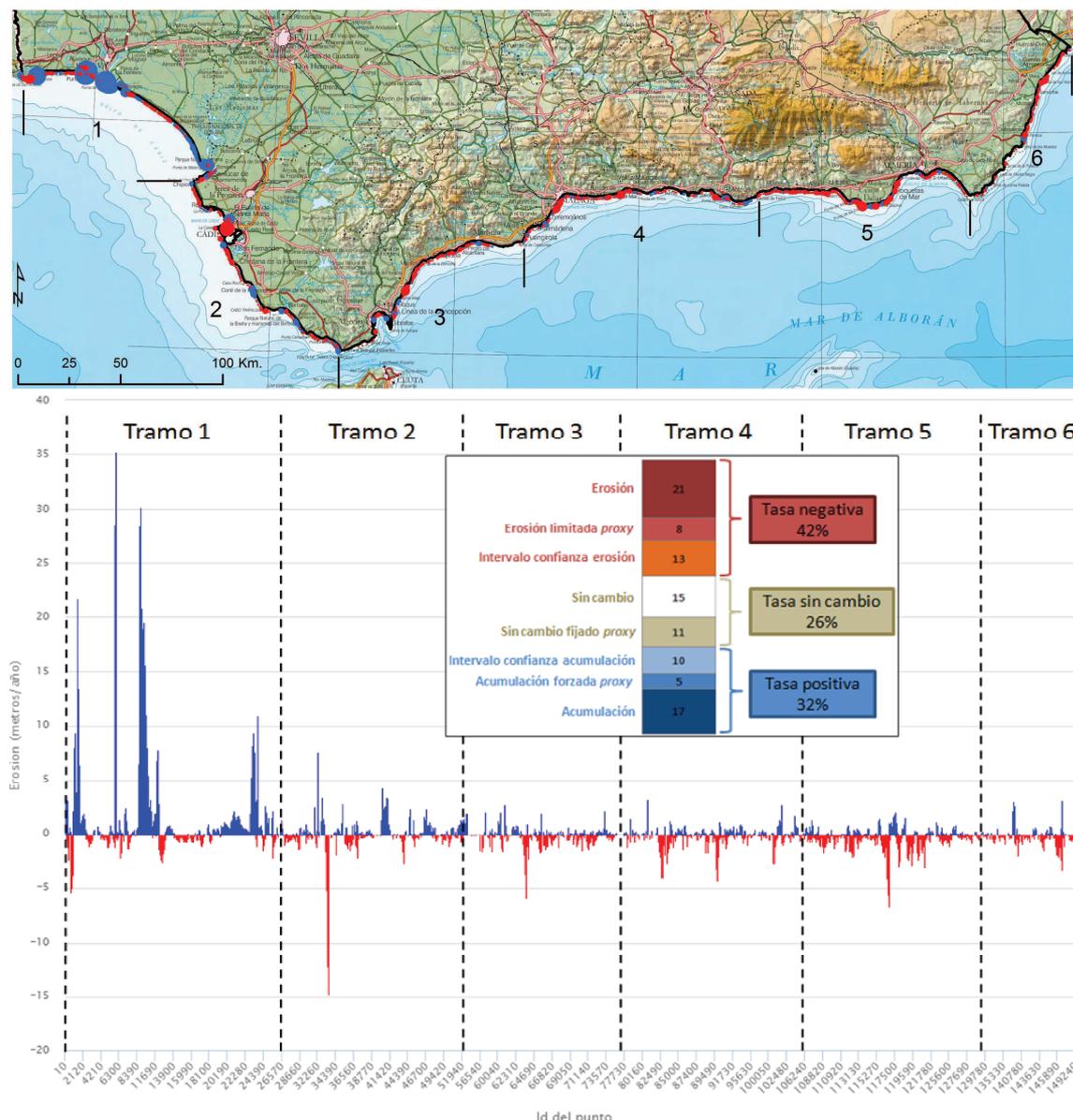


Figura 4.6. Transectos con tasas positivas y negativas para el período de referencia 1977-2011. Fuente: elaboración propia.

SUPERFICIE EROSIONADA O ACUMULADA (TASAS DE RETROCESO O PROGRADACIÓN 1977-2011)

Si bien la distribución espacial de los transectos en el gráfico de barras permite una primera evaluación de la distribución espacial de los procesos erosivos a lo largo de la línea de costa de Andalucía, ésta no incluye una valoración cuantitativa de la intensidad de los mismos, aunque puede derivarse visualmente del gráfico. Por ello, se ha realizado una cuantificación de la **intensidad expresada como superficie erosionada o acumulada**. Para ello se ha acumulado la distancia positiva o negativa de la oscilación

de la línea de costa entre ambas fechas (de donde se derivan las tasas) y se ha multiplicado ésta por 50 (equidistancia de los transectos utilizados para su cálculo). El resultado de estos cálculos para la totalidad de la costa está recogido en Figura 4.7. De este resultado cabe destacar las siguientes consideraciones:

- ⇒ Aunque el número de transectos con tasas negativas es superior al de positivas, cuando se acumula su **intensidad**, el gráfico revela que **la superficie erosionada es inferior a la acumulada**, alcanzando un total de **casi 500 Has. perdidas**. Ello supone un **retroceso medio de la línea de costa de 20 m. para los 249 Km.** de playas afectadas por la erosión.
- ⇒ Por el contrario la **superficie acumulada** por los procesos de acreción de las tasas positivas se eleva a **casi 800 Has.**, lo cual supone un **avance medio de la línea de costa de 42 m. para los 188 Km.** de playas afectadas por procesos acumulativos.

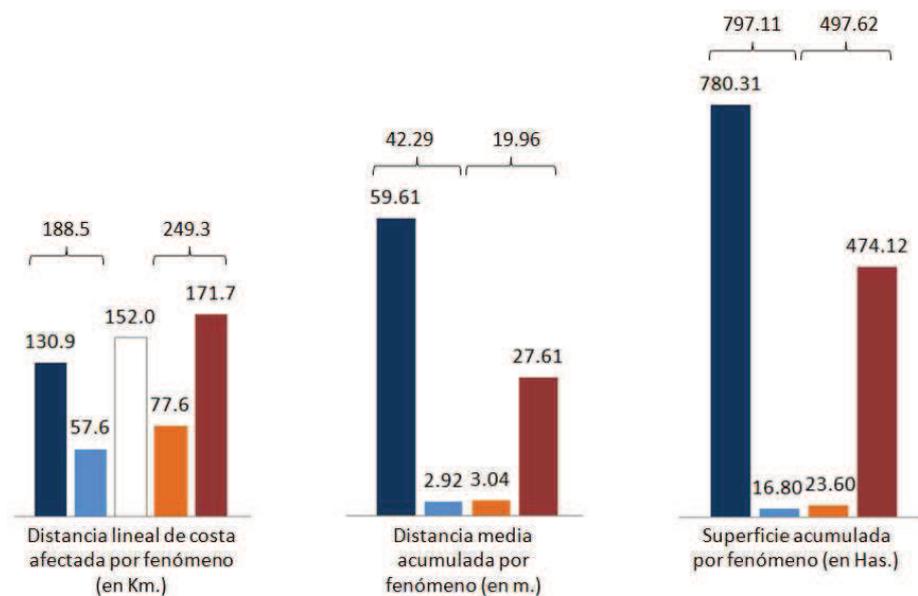


Figura 4.7. Estadísticos por fenómeno acumulativo/erosivo realizado sobre el período de referencia 1977-2011.

Fuente: elaboración propia.

Esta paradoja, la presencia de una mayor distribución espacial de la erosión (número de transectos) respecto a la acumulación, pero una mayor superficie litoral afectada por ésta, se explica por **el tipo de proxy elegido** y la **simplificación bidimensional** del cálculo de las tasas de erosión, cuando en realidad es un proceso tridimensional (volumétrico). Tal y como se explicó en el Capítulo 2 de la presente Tesis Doctoral, la erosión de playas es un proceso tridimensional que implica una pérdida de

volumen de sedimentos, uno de cuyos resultados morfológicos es el retroceso de la línea de costa. Por otra parte, el *proxy* elegido (contacto *backshore/foredune*, acantilado o infraestructura), siendo el mejor para los estudios a largo/medio plazo por aislarlo de las modificaciones del perfil activo de la playa (perfil de temporal o bonanza) y de la influencia de la marea, sólo permite el cálculo de la erosión simplificando las tasas a un proceso bidimensional (retroceso lineal/número años del período). Así, las superficies afectadas por la erosión son dunas costeras o formaciones sedimentarias (deltas, planicies litorales, terrazas marinas, acantilados de rocas deleznable...) que siempre tienen una magnitud altimétrica superior a las formaciones que generan los espacios con tasas positivas (playas progradantes, flechas litorales, etc.). Por ello, en este contexto, a pesar de que los resultados son coherentes, su interpretación debe ser realizada con precaución, evitando la exposición de ideas no adecuadamente contextualizadas. Como ejemplo de lo anterior, 1 m. de retroceso en el acantilado del Asperillo (constituido por antiguos mantos eólicos apilados y altamente erosionables) supondría como media 20 m.³ de arena aportados al sistema litoral (si le asignamos 20 m. de altitud media). Para conseguir **retener** ese mismo volumen de sedimentos en una playa progradante con dunas de 2 m., necesitaríamos una progradación de 10 m.

4.2.2.2. COMPARACIÓN CON EL PERÍODO HISTÓRICO (1956-1977)

NUMERO DE “TRANSECTOS” CON TASAS POSITIVAS Y NEGATIVAS PARA EL PERÍODO 1956-1977

La comparación del número de transectos que indican la distribución espacial de las tasas arrojan las siguientes diferencias para este período (ver Figuras 4.8 y 4.9):

- ⇒ **Siguen predominando las tasas erosivas** en el mismo porcentaje que en el período de referencia (un **42%**), si bien las tasas limitadas por el *proxy* dentro de este porcentaje es menor. Este hecho se debe, claramente, a la menor presencia de infraestructuras en este período (el número de transectos afectados se reducen del 12% al 7%), de la misma forma que se reducen las tasas erosivas que se sitúan dentro del intervalo de incertidumbre del método (del 11% al 5%). Este último hecho resulta lógico; los cambios son más intensos, pudiéndose asegurar que la presencia de tasas erosivas, al margen del error del método, son más numerosas en este período. De todos los tramos erosivos en ambos períodos, un **21%** se sitúan en los mismos transectos (**tendencia erosiva en ambos períodos**).

- ⇒ Por el contrario, el **número de transectos con tasas acumulativas se reducen (del 32% al 25%)**, lo cual indica que una parte de los transectos con tasas positivas en el período de referencia se explica por las importantes alteraciones antrópicas que se producen a partir del 1977, algunas de las cuales inducen a progradaciones de gran magnitud (diques del río Tinto-Odiel)
- ⇒ El número de transectos con **comportamiento estable aumenta** sensiblemente respecto al período de referencia (**un 33%**) debido a la todavía escasa alteración a los aportes al tránsito sedimentario por infraestructuras, lo cual, lógicamente, hace reducir también los valores estables “forzados” por las mismas.

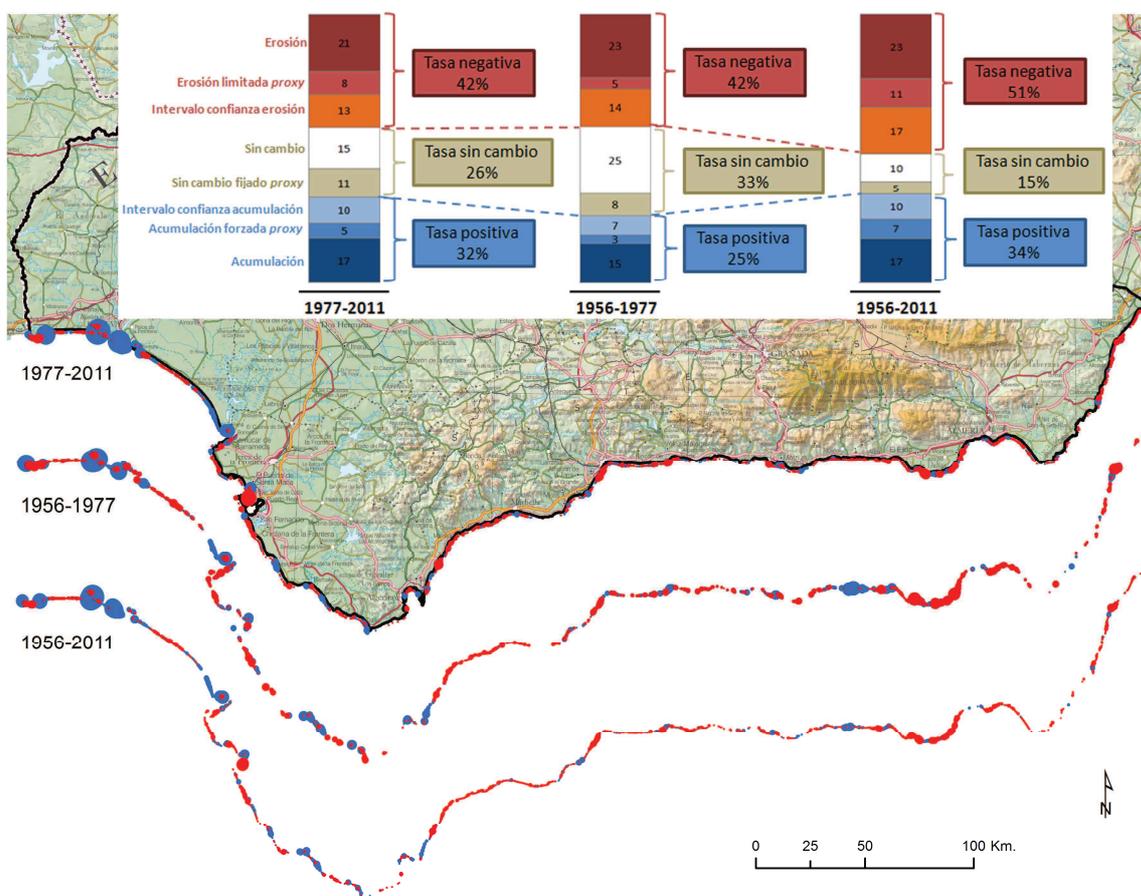


Figura 4.8. Comparación de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos históricos 1956-1977 y 1956-2011 (ver Anexo 1).
Fuente: elaboración propia.

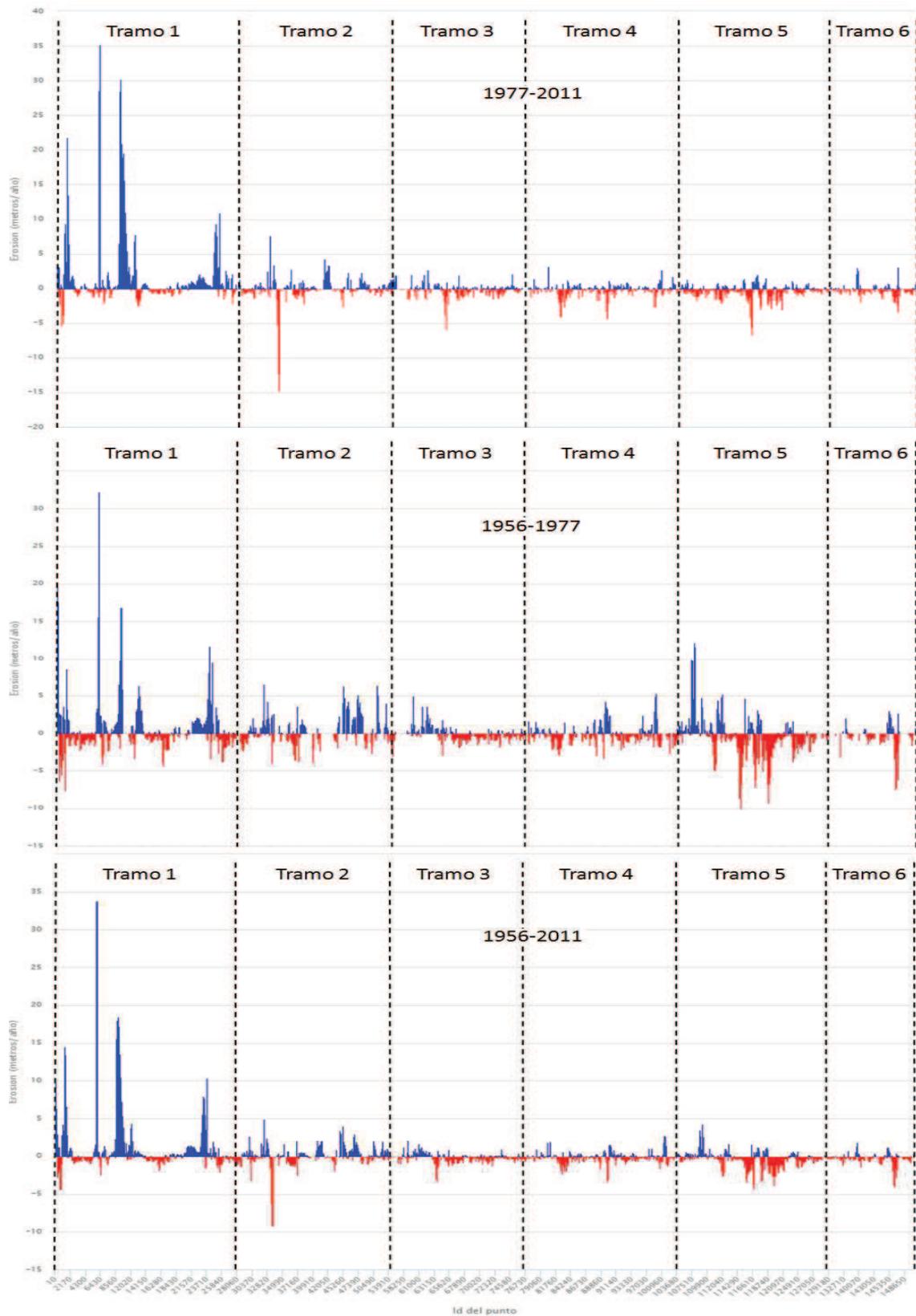


Figura 4.9. Gráfico comparativo de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos históricos 1956-1977 y 1956-2011.

Fuente: elaboración propia.

SUPERFICIE EROSIONADA O ACUMULADA (TASAS DE RETROCESO O PROGRADACIÓN)

La superficie erosionada o acumulada en este intervalo presenta el mismo comportamiento que en el período de referencia. Así, si bien se muestra una mayor distribución espacial de la erosión (número de transectos) respecto a la acumulación, son mayores las superficies acumuladas. Del mismo modo, pueden extraerse las siguientes consideraciones:

- ⇒ Aunque el número de transectos con tasas negativas es superior al de positivas, cuando se acumula su **intensidad** (ver Figura 4.10), se revela que **la superficie erosionada es inferior a la acumulada**, aunque por un escaso margen (**498 Has.**). Esta superficie erosionada supone un retroceso medio de la línea de costa de **20 m.** para los **250 Km.** de playas afectadas por la erosión en este período.
- ⇒ Por el contrario la **superficie acumulada** por los procesos de acreción presenta valores muy similares a las negativas (**507 Has.**), lo cual supone un incremento de la superficie de **avance medio de la línea de costa de 34 m. (menor que en el período anterior)**. Ello se debe a la reducción de los kilómetros de playas afectadas por tasas positivas (de 188 Km en el período de referencia a **150 Km.** en este intervalo).
- ⇒ En consecuencia con los datos de los transectos erosivos y negativos anteriores, se amplían los kilómetros donde el comportamiento es estable, el cual se eleva a **casi 200 Km.**

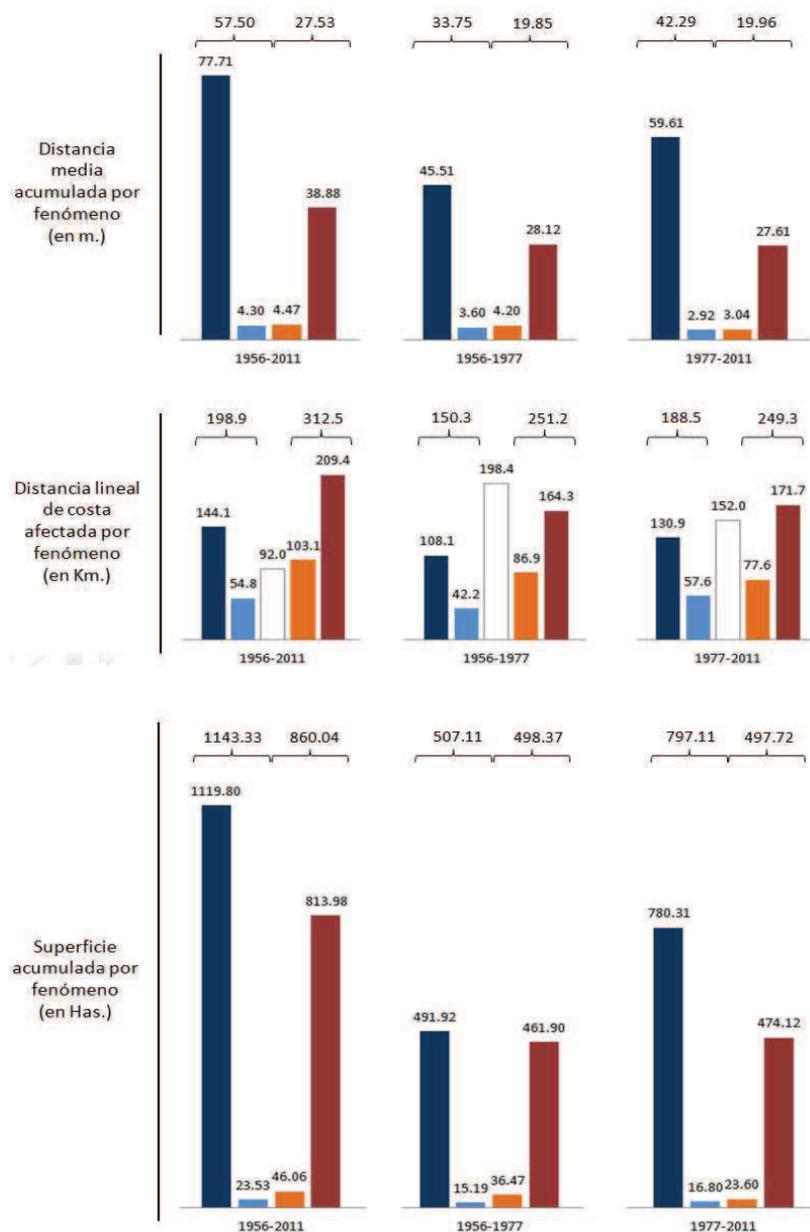


Figura 4.10. Comparación de estadísticos por fenómeno acumulativo/erosivo realizado sobre el período de referencia 1977-2011 y los períodos históricos 1956-1977 y 1956-2011. Fuente: elaboración propia.

4.2.2.3. COMPARACIÓN CON LA EVOLUCIÓN RECIENTE (1977-2001 Y 2001-2011)

NÚMERO DE “TRANSECTOS” CON TASAS POSITIVAS Y NEGATIVAS PARA LOS PERÍODOS 1977-2001 Y 1977-2011

Como puede observarse en las Figuras 4.11 y 4.12, en ambos períodos el número de transectos erosivos es superior al de aquellos que presentan tasas positivas, si bien se pueden apreciar diferencias entre ambos:

- ⇒ En el período **1977-2001**, los **transectos con tasas negativas** representan un porcentaje ligeramente **inferior** (un **40%**, aproximadamente **235 Km.** de playas afectadas), siendo además su distribución espacial también muy similar. Por el contrario, en el período **2001-2011**, se produce una **reducción sustancial en el número de transectos con valores de tasas erosivas** respecto al período de referencia, casi duplicando a los transectos que presentan un comportamiento acumulativo (suponen un porcentaje del 19%, representando 116 Km. de playas afectadas).
- ⇒ En relación a los **transectos que presentan tasas positivas** en el intervalo **1977-2001**, su número y distribución sigue siendo también muy similar al del período de referencia (un 34%, representando 202 Km. de playas afectadas). Por el contrario, al igual que ocurría con las tasas negativas, en el intervalo **2001-2011** se produce una **reducción sustancial en el número de transectos con valores de tasas positivas** respecto al período de referencia, alcanzando solamente un porcentaje del 9% (55 Km. de playas afectadas), menos de la mitad de los transectos con tasas negativas.
- ⇒ Como era de esperar por los datos anteriores, las mayores diferencias se producen en los transectos que tienen un **comportamiento estable**. El número de ellos para el intervalo **1977-2001** es similar al del período de referencia, incluso ligeramente superior (27%, equivalente a 157 Km. de playas). El período **2001-2011** presenta, en cambio, un aumento muy considerable afectando al **72%** de las playas de Andalucía, lo cual supone 441 Km. del total de las mismas.

Los valores similares entre el período de referencia y el que abarca desde **1977 a 2001** son esperables, ya que comparten casi 25 años. No obstante, el cambio principal ocurre en el intervalo actual de **2001-2011** teniendo como causa la reducción de los transectos negativos y positivos por el considerable aumento de los transectos con un comportamiento estable. Si solo se hubiera analizado este último período se podría deducir que la mayor parte de las playas de Andalucía presentan un comportamiento estable, aunque los transectos que presentan un comportamiento erosivo siguen duplicando a los que presentan tasas positivas. La valoración conjunta de ambos períodos y el tipo de *proxy* utilizado para su cálculo permiten una valoración más correcta de estos datos así como la propuesta de otra posible interpretación que contradice la primera impresión de predominio de las playas con comportamiento estable.

El *proxy* utilizado (límite entre playa alta y la duna costera, acantilados o infraestructuras antrópicas) y el incremento de presión antrópica sobre la costa producida durante este último intervalo (*boom* urbanístico hasta la crisis de 2009), junto a la perspectiva histórica del período anterior (1977-2001), permiten aclarar, en parte, este elevado **incremento de los transectos estables** ya que en gran parte son “**forzados**” por la presencia de infraestructuras antrópicas (paseo marítimos, escolleras, muros de defensa, urbanización sobre la playa, etc.). Para constatar este hecho se han seleccionado entre los **transectos estables** aquellos que en la Ortofotografía de 2011 el retroceso de la línea de costa estaba impedida por infraestructuras u otros elementos antrópicos, arrojando un casi un 40% del total y representando casi 180 Km. lineales de costa. Estos transectos responden en el período anterior (1977-2001) a comportamientos claramente diferenciados, de tal forma que 59 Km. habían tenido un comportamiento regresivo y 54 Km. un comportamiento positivo en los que el avance se ha paralizado por un claro déficit sedimentario.

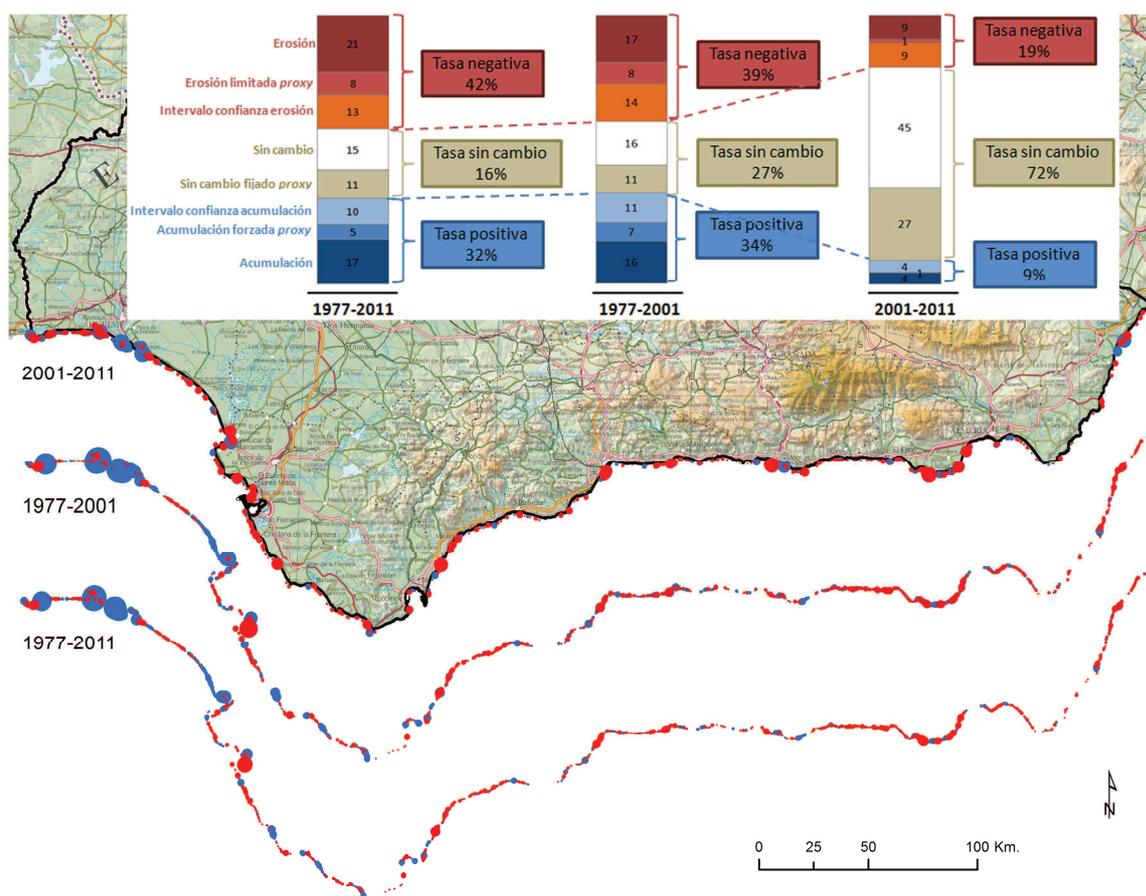


Figura 4.11. Comparación de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos recientes 1977-2001 y 2001-2011 (ver Anexo 2).
Fuente: elaboración propia.

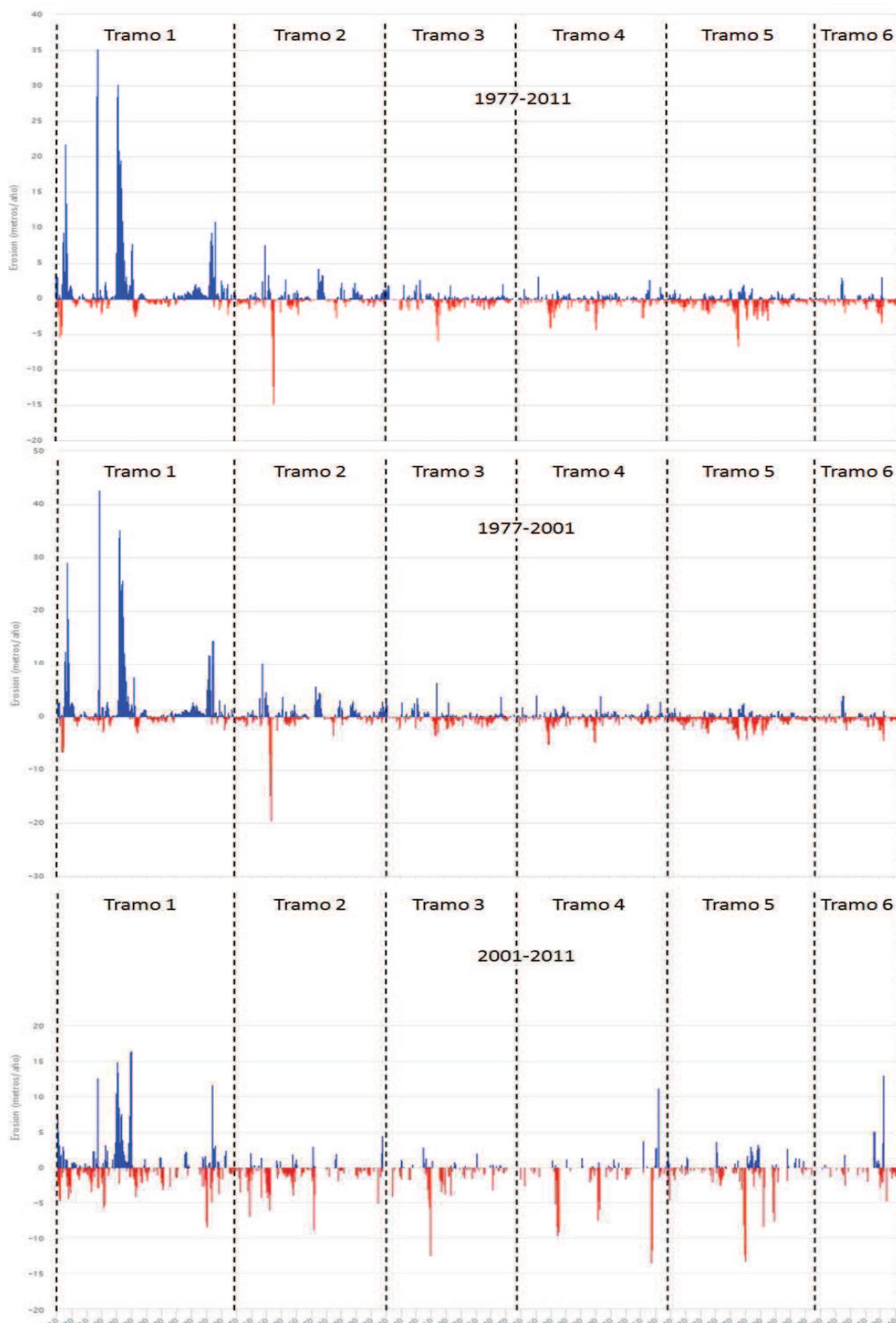


Figura 4.12. Gráfico comparativo de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos recientes 1977-2001 y 2001-2011.

Fuente: elaboración propia.

SUPERFICIE EROSIONADA O ACUMULADA (TASAS DE RETROCESO O PROGRADACIÓN)

Al incorporarse la intensidad de los procesos de erosión o acumulación en el análisis, la superficie erosionada y acumulada muestra rasgos comunes y diferencias respecto al período de referencia (ver Figura 4.13).

- ⇒ El intervalo 1977-2001 presenta cifras de **superficies erosionadas** muy similares a las del período de referencia, alcanzando **421 Has.**, que suponen un retroceso medio de **14 m.** para los 235 Km. de playas afectadas. Por el contrario, como en los casos anteriores para el último período **2001-2011**, se produce una drástica reducción de la superficie erosionada alcanzando sólo las **119 Has.**, aunque en este caso, a diferencia de los anteriores, es una superficie superior a la acumulada. Esta superficie erosionada para el último período supone una **retroceso medio** de **10 m.** para los **116 Km.** de playas afectadas.
- ⇒ En relación a la **superficie acumulada**, los resultados para el intervalo 1977-2001 constatan un comportamiento similar al período de referencia (**812 Has.** que suponen un avance medio de la línea de costa de **40 m.** para los 202 Km. de playas afectadas) y una drástica reducción de la superficie acumulada para el período más reciente (2001-2011) donde ésta afecta sólo a **74 Has.** que suponen un **avance medio** de la línea de costa de **14 m.** para los escasos **55 Km.** de playas afectadas.

La misma paradoja, ya explicada en el período de referencia (mayores superficies acumuladas en el total de tramos acumulativos respecto a los que presentan erosión), se cumple en el intervalo 1977-2001, pero no así en el más reciente (2001-2011), donde la superficie acumulada es mayor en los tramos erosivos. La paradoja se mantiene al comparar los retrocesos/avances medios (14 m. de avance por 10 m. de retroceso), poniendo en relación la superficie con el número de tramos o distancia lineal de costa afectada. La explicación se encuentra, de nuevo, en el *proxy* utilizado y, por tanto, en la simplificación del proceso erosivo (tridimensional en la realidad) a cálculos bidimensionales ya comentadas previamente (las superficies afectadas por procesos erosivos tienen una magnitud altimétrica superior a las formaciones que generan los espacios con tasas positivas).

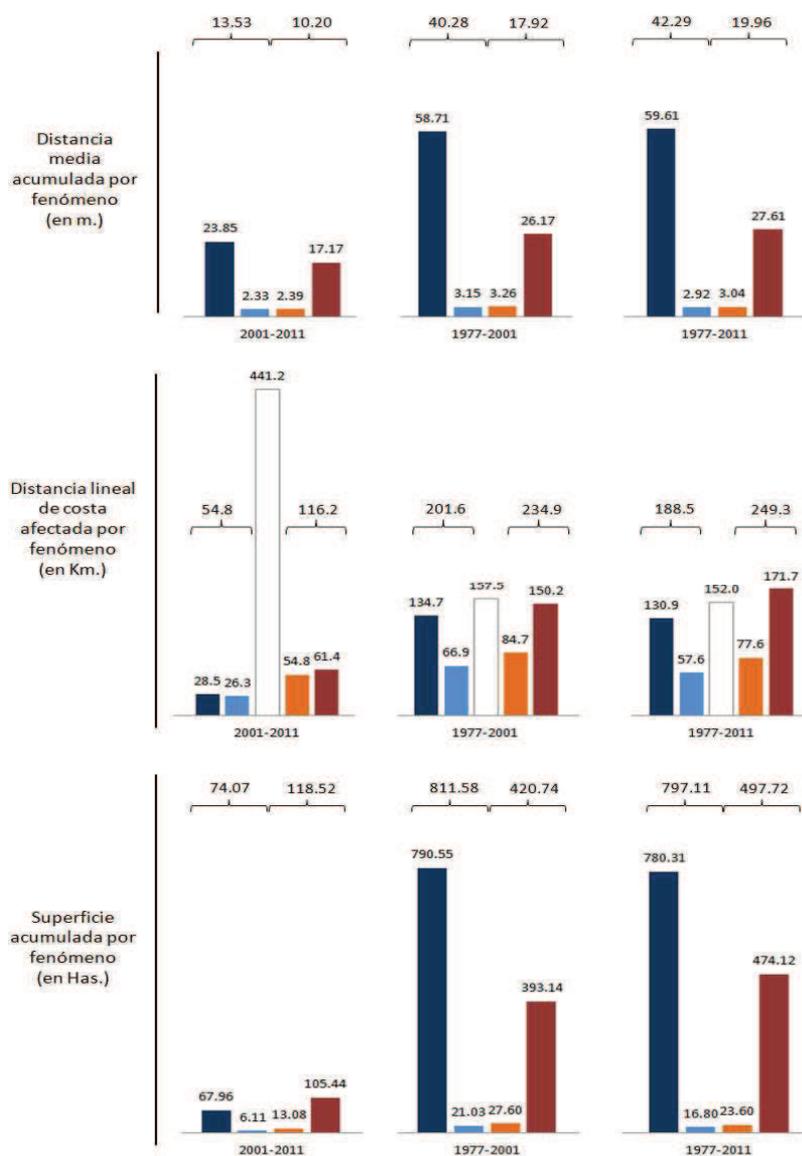


Figura 4.13. Comparación de estadísticos por fenómeno acumulativo/erosivo realizado sobre el período de referencia 1977-2011 y los períodos recientes 1977-2001 y 2001-2011. Fuente: elaboración propia.

4.2.3. TRAMO 1: RÍO GUADIANA-PUERTO DE CHIPIONA

4.2.3.1. LÍMITES, EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA RECIENTE Y BALANCE SEDIMENTARIO

LÍMITES

El **Tramo 1** describe el ámbito costero correspondiente al Tramo río Guadiana-puerto de Chipiona. La ubicación de dicha franja litoral entre los dos grandes ejes fluviales de Andalucía (Guadalquivir y Guadiana), junto a una potente deriva litoral hacia levante, dotaba históricamente antes de las intervenciones antrópicas, de conexión sedimentaria a todo el sector entre ambas desembocaduras, de unos 136 Km. de longitud.

Para este Tramo se ha elegido como **límite occidental** la **desembocadura del río Guadiana** (un límite actual a la dinámica longitudinal casi total, debido a la construcción de los diques de acceso durante la década de 1970). Como **límite oriental** se ha seleccionado el **puerto de Chipiona**. En este caso, la desembocadura del río Guadalquivir (límite natural de la unidad fisiográfica original) y la movilidad de su cauce pueden provocar el traspaso a medio plazo de sedimentos de la costa onubense a la gaditana. Por ello, se ha seleccionado el puerto de Chipiona, ya que, al margen de su conexión dinámica y sedimentaria, todo el frente septentrional de las playas de Sanlúcar de Barrameda están influenciadas por la dinámica del cauce del río Guadalquivir (procesos erosivos del margen izquierdo). El acantilado ubicado en el casco histórico de Sanlúcar de Barrameda, resultado de los procesos erosivos ligados al Máximo Transgresivo Flandriense hace entre 7.000 (Zazo et al, 1996; A. Rodríguez et al., 1997) y 6.000 años (Morales y Borrego, 2008), evidencia este hecho, convirtiéndose en un acantilado relicto tras la posterior acumulación de sedimentos arenosos que hicieron avanzar la costa hasta la posición actual.

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA RECIENTE

Como puede apreciarse en la Figura 4.14, la costa onubense, como el resto de la actual configuración de la costa andaluza, tiene su origen en el Máximo Transgresivo Flandriense, vinculado a la última remontada del nivel del mar desde la posición que ocupó durante el descenso asociado al último período glacial (estadio isotópico 2) hace aproximadamente 18.000-20.000 años. Esta remontada del nivel del mar inundó las desembocaduras de los principales ríos y estuarios, configurando una costa muy diferente a la actual, con una sucesión de bahías y ensenadas separadas por tramos

acantilados (Ojeda, 1988b). La actual disposición del frente costero responde al proceso de regularización costera controlada por la dinámica litoral mediante el desarrollo de formaciones arenosas (islas barreras, flechas y contraflechas litorales) que fueron cerrando las antiguas ensenadas asociadas a las desembocaduras de los ríos de la unidad (Guadiana, Piedras, Tinto-Odiel y Guadalquivir), favoreciendo el desarrollo de marismas mareales en las zonas internas protegidas del oleaje.

La evolución geomorfológica reciente en los últimos 6.000 años ha generado, por lo tanto, una costa totalmente diferente, ligada al proceso de **regularización costera** por el desarrollo de diferentes tipos de formaciones arenosas litorales:

- ⇒ **islas-barreras evolucionadas** (Guadiana, Isla Cristina, Antilla, Rompido) al cerrarse las barras o pasos ("*tidal inlet*") que las separaban hasta el siglo XVIII (Ojeda, 1988b),
- ⇒ **flechas y contraflechas** litorales que cerraron las antiguas bahías de los ríos Tinto-Odiel y Guadalquivir (Punta Umbría-Punta Arenillas y Punta de Malandar-flecha de la Algaida) y
- ⇒ **formaciones arenosas ligadas a la dinámica eólica** que favorecieron el desarrollo del:
 - Apilamiento de mantos eólicos correlativos a las diferentes fases del ascenso del nivel del mar desde el estadio isotópico 2, que posteriormente fueron erosionados para definir un acantilado activo de más de 20 m. de altura media (acantilado del Asperillo) con playas en su base (Dabrio et al., 1996).
 - Sistema de dunas móviles activas que prograda varios kilómetros hacia el interior (Doñana), alimentado por playas arenosas apoyadas en la flecha de Punta de Malandar.

El relleno con sedimentos de granulometría fina de los espacios protegidos del oleaje por estas formaciones arenosas dieron lugar a marismas mareales (Isla Cristina, Piedras, Tinto-Odiel...), dinamizadas por importantes corrientes de marea que recorren estuarios y caños como corresponde a una costa mesomareal (rango mareal superior a 2 m. y régimen semidiurno). La intensa alimentación por sedimentos finos del último tramo del río Guadalquivir ha hecho evolucionar un sector de estas marismas mareales hacia las marismas fluvio-pluviales (Doñana), cuyos procesos de inundación son ahora claramente estacionales.

El resultado final es una costa rectilínea con playas adosadas a estas formaciones arenosas litorales que, debido a la deriva dominante hacia levante, formaban una gran unidad fisiográfica litoral desde las islas-barreras del Algarve hasta la desembocadura del Guadalquivir. El hecho de prolongar este tramo de análisis hasta el puerto de Chipiona se ha justificado en la introducción de este apartado. Esta situación ha sido profundamente modificada por las alteraciones antrópicas, descritas a continuación.

BALANCE SEDIMENTARIO

En primer lugar es destacable la existencia para todo el Tramo de una importante **deriva litoral** que presenta una componente energética positiva hacia **levante** (Figura 4.14), debido a la oblicuidad con que le llegan los frentes del oleaje dominante del tercer cuadrante. Las características del oleaje no sólo vienen determinadas por el régimen de vientos (con clara influencia atlántica), sino por la apertura de sus costas al Océano Atlántico, lo que origina un oleaje de fondo de gran *fetch* y, a su vez, propician un marco idóneo de transporte y sedimentación en el sector. La potente deriva dominante hacia levante, muy sensible a la orientación de la costa respecto al oleaje incidente, es el elemento clave para entender la evolución de las playas de todo este Tramo.

Al balance sedimentario se alude, en primer lugar, a los **inputs sedimentarios** (entrada de sedimentos al sistema playa), destacando:

- ⇒ **Aportes puntuales:** Como **principal input** sedimentario de todo el Tramo hasta la desembocadura del río Guadalquivir destaca el **río Guadiana**, única red fluvial que en la actualidad aporta sedimentos de granulometría adecuada para la alimentación de las playas, cuyos aportes regulares hacen de su desembocadura uno de los sectores más dinámicos de la costa de Andalucía.
- ⇒ **Aportes zonales:**
 - Tradicionalmente todo el sector también se alimentaba de las arenas procedentes de las playas asociadas a las islas barreras del sur del **Algarve** portugués que, movilizadas por la deriva, conseguían pasar la desembocadura del Guadiana.
 - Sectores erosivos sobre las formaciones arenosas litorales, entre las que destaca el extenso sector asociado al **acantilado del Asperillo**.
 - Potenciales aportes de la **zona antelitoral sumergida**, de difícil cuantificación.

En relación a los **outputs** (salida de sedimentos del sistema playa-duna costera) destacan:

- ⇒ Salidas de sedimentos asociadas a la propia **dinámica progresiva de las formaciones arenosas litorales**. Históricamente la progradación de islas-barrera, flechas litorales y contraflechas han significado la estabilización de estos sedimentos (Rodríguez et al., 2000).
- ⇒ Salidas de sedimentos asociadas a la **dinámica eólica**. La combinación de playas progradantes con un viento dominante del tercer cuadrante ha significado históricamente la detracción de sedimentos del sistema playa para incorporarse a sistemas dunares (dunas progresivas, *blow-out*, etc.). Éstos son extremadamente frecuentes en este Tramo, consolidándose como sistemas progradantes hacia el interior alcanzando distancias considerables. Entre ellas destacan:

- Los **mantos eólicos relictos** conforman el apilamiento de sedimentos del domo del Abalario y evidencian su potente acción asociada a la progresiva subida del nivel del mar desde la posición que ocupaba durante el máximo glacial (estadio isotópico 2).
- Los **complejos de dunas** estabilizados, semiestabilizados y móviles de gran magnitud que avanzan hacia el interior sobre la flecha de Malandar en Doñana han significado igualmente una importante detracción de sedimentos del sistema playa y, en gran parte, continúan haciéndolo en la actualidad.
- En menor medida, las posibles pérdidas de sedimentos hacia la **zona submarina** (delta del río Guadiana, desembocadura del río Guadalquivir) y hacia el interior de las marismas.

Esta situación en relación al balance sedimentario explica la evolución reciente de todo este Tramo, si bien, especialmente desde la década de 1950, este esquema general ha sufrido profundas modificaciones derivado de las intensas **alteraciones antrópicas** que han afectado tanto a los inputs como a los outputs sedimentarios.

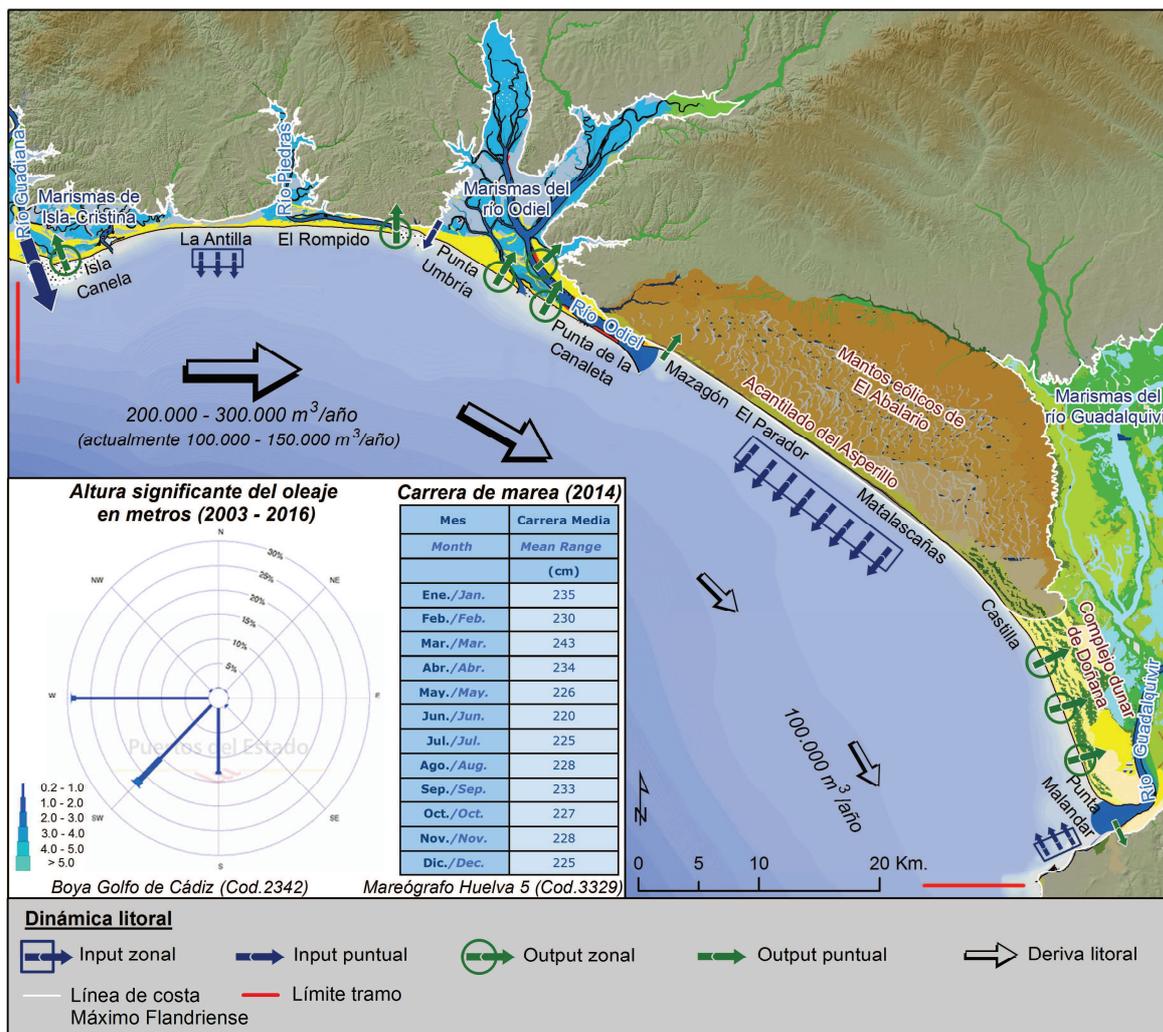


Figura 4.14. Límites, evolución geomorfológica y balance sedimentario en el Tramo 1 (río Guadiana-puerto de Chipiona). Fuente: elaboración propia.

4.2.3.2. ALTERACIONES ANTRÓPICAS

Las principales alteraciones antrópicas (Figura 4.15) que suponen una profunda modificación de las características que controlaban la dinámica de las playas de todo este Tramo, se podrían agrupar en:

- ⇒ Alteraciones que suponen **cambios en los aportes y el balance sedimentario** en las cuencas vertientes (embalses y presas).
- ⇒ Alteraciones de la **dinámica longitudinal** que interrumpen el tránsito parcial o total de los sedimentos (construcción de los diques que defienden la desembocadura de los ríos Guadiana, Carreras y Tinto-Odiel) que, en este Tramo, son consideradas de gran importancia al dividir la costa de Huelva en dos unidades claramente independientes (Tramo Guadiana-Odiel y Odiel-Guadalquivir).

ALTERACIONES A LOS APORTES Y AL BALANCE SEDIMENTARIO

Las alteraciones a los aportes y al balance sedimentario constituyen un elemento esencial puesto que en la mayor parte de la costa andaluza, al igual que en el resto de la costa española, los principales aportes sedimentarios son de origen terrígeno, ligados a los aportes fluviales. En este caso es importante destacar los siguientes aspectos:

- ⇒ Como ya se ha comentado, de todos los ríos que avenan este Tramo, el río Guadiana constituye en el período de estudio el principal input capaz de aportar sedimentos de granulometría adecuada para alimentar las playas, excluyendo los sedimentos finos (limos y arcillas, principalmente) depositados en la marismas. La pendiente longitudinal que caracteriza el curso bajo del río, al descender directamente desde Sierra Morena, permite arrastres de granulometría grosera, siendo ejemplo de su importancia el extenso delta submarino asociado al mismo (Morales, 1997; Sánchez et al., 2014). Según Morales (1993), la aportación para los últimos 44 años del río Guadiana se cifra en $57,90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$ de aporte en suspensión y $43,96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$ de aportes en carga de fondo. No obstante, en su último trabajo (HIDTMA, 2001), se estima que los aportes sedimentarios del río Guadiana, en la actualidad, habrían disminuido hasta un valor aproximado entre 100.000 y 150.000 $\text{m}^3/\text{año}$, debido a la intensa **regulación** de su **cuenca vertiente** por la construcción de embalses, que ha ido mermando sus aportes, efecto intensificado con la construcción muy próxima a la desembocadura de la presa de Alqueva en el año 2002 (Morales, 2010).
- ⇒ A la disminución de los aportes sedimentarios del río Guadiana, hay que sumar la también merma de los sedimentos procedentes de la costa del Algarve que, movilizados por la deriva dominante hacia levante, podían superar la desembocadura del mismo. La construcción de los **diques** dobles en su desembocadura explican este hecho.
- ⇒ A todos ellos, es necesario sumar los sistemáticos **dragados** de los principales accesos a los puertos en los estuarios del Tramo (Guadiana, Carreras, Piedras, Tinto-Odiel y Guadalquivir).
- ⇒ Por el contrario, 2 actuaciones recientes han contribuido positivamente al balance de sedimentos del Tramo, si bien de forma muy puntual:
 - Las **regeneraciones artificiales de playas** de gran importancia turística afectadas por procesos erosivos (Islantilla, Playa de Castilla, Matalascañas...).

- Las actuaciones de **regeneración dunar** que favorecen la retención de sedimentos (sector Isla Cristina-La Antilla).

ALTERACIONES A LA DINÁMICA LONGITUDINAL

La construcción en este Tramo de elementos antrópicos que alteran la dinámica longitudinal resulta de gran trascendencia (Ballesta et al., 1998), al estar dominado por una potente deriva litoral. En todos los casos va a suponer un doble efecto: un sector acumulativo en la margen de la infraestructura situada a favor de la deriva, que retiene una parte de los sedimentos que ésta transporta y un sector regresivo en la margen contraria de la misma donde la deriva recupera su carga sólida y erosiona el sector inmediatamente posterior a la infraestructura en el sentido de la deriva dominante.

Las siguientes infraestructuras han actuado como **barreras totales** y suponen la división de la unidad fisiográfica original (Algarve-Guadalquivir) en otras de menor entidad desconectadas sedimentariamente (río Guadiana-dique Juan Carlos I y dique Juan Carlos I-río Guadalquivir):

- ⇒ **Diques de la desembocadura del río Guadiana-ría Carreras:** Este caso, ya estudiado por diferentes autores (Ojeda, 1988b; Morales y Borrego, 2008), ha significado en los primeros años de su construcción el aislamiento efectivo de los sedimentos procedentes del Algarve. Aun cuando los sedimentos en los últimos años parecen atravesar la desembocadura del río Guadiana, estos se encuentran con la barrera de los diques de acceso al puerto de Isla Cristina, causando un doble efecto:
- Las arenas del antiguo delta submarino del río Guadiana quedan entre ambos diques generando un efecto directo sobre las playas de Isla Canela, caracterizadas por la alternancia de sectores erosivos y progresivos según la cambiante posición de los fondos arenosos.
 - El efecto combinado de ambos genera una disminución neta de sedimentos en las playas aguas abajo en sentido de la deriva, excepto un ámbito progresivo en los sectores inmediatos al dique de Isla Cristina por el efecto de sombra de los mismos al oleaje dominante del tercer cuadrante.
- ⇒ **Dique de Juan Carlos I:** Apoyado en las marismas del sector occidental del estuario del río Tinto-Odiel y en parte de los bajos asociados a su delta submarino, su magnitud y profundidad hacen de él una **barrera total** que

provoca la segmentación de la costa onubense en 2 Unidades independientes: subtramos Guadiana- Tinto-Odiel y Tinto-Odiel-Guadalquivir (esta última sólo alimentada por la arenas que el oleaje pueda conseguir de la erosión del acantilado del Asperillo o desde la zona antelitoral, de difícil cuantificación).

Entre las infraestructuras que actúan como **barreras parciales**:

- ⇒ **Dique de Punta Umbría**: Situado en la margen derecha de la ría homónima, su magnitud intercepta los sedimentos provenientes de los sectores de El Rompido y La Bota. Desde su construcción en la década de 1980, ejerce un efecto de retención que provoca la acumulación masiva de sedimentos en la margen izquierda del mismo.
- ⇒ **Puerto de Mazagón**: Situado en el interior de la ría Tinto-Odiel, experimenta efectos de acumulación en su sector oriental debido a la refracción del oleaje causado por el dique de Juan Carlos I en detrimento de su sector occidental, acusado por procesos erosivos causados por la movilización sedimentaria hacia el interior de la ría.
- ⇒ **Campo de espigones**: Construido para favorecer la estabilización sedimentaria en playas regresivas (Matalascañas y La Bota), consiguen propagar la erosión aguas abajo de la deriva para compensar el material sedimentario retenido en los mismos.

ALTERACIONES A LA DINÁMICA TRANSVERSAL

La ocupación de dunas y playas por la construcción de paseos marítimos y muros de defensa, así como por otras infraestructuras que interrumpen el tránsito transversal de sedimentos, tienen un efecto inmediato en las playas, ya que imposibilitan el correcto ajuste de su perfil (disminuyendo su pendiente en temporales para maximizar la disipación de energía) y, por lo tanto, favorecen los procesos erosivos. Entre las diferentes tipologías de estas alteraciones, en este Tramo pueden encontrarse:

- ⇒ **Ocupación de dunas costeras y playas** por elementos urbanos, como es el caso de La Antilla, Isla Canela o Mazagón.
- ⇒ **Construcción de muros de defensa, escolleras y paseos marítimos** que no sólo impiden la adaptación del perfil a las características puntuales del oleaje (por ejemplo en Isla Canela) sino que, además, su presencia genera un efecto

de reflexión del oleaje sobre los mismos, amplificando el efecto de las olas que consiguen descalzar la infraestructura mediante el colapso de los mismos.

4.2.3.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN

Una vez delimitado el Tramo de análisis y analizado su evolución geomorfológica y balance sedimentario, así como las principales alteraciones antrópicas, se procederá en este apartado al análisis e interpretación de las tasas de erosión. Para facilitar el análisis e interpretación se ha subdividido este Tramo en 5 sectores (Figura 4.16). Para un correcto y eficiente análisis de las tasas de erosión se ha considerado incluir en esta Tesis Doctoral el tratamiento de, al menos, 4 grandes puntos. En primer lugar se realizará una descripción completa de las fuentes utilizadas y sus características para cada sector, prestando especial atención a su calidad geométrica y radiométrica, así como a las fechas. En segundo lugar se presentarán, de manera general y a grandes rasgos para el período de referencia 1977-2011, los sectores erosivos y regresivos en el Tramo de análisis. Seguidamente se comentarán sus principales diferencias con respecto al período histórico 1956-1977 y, por último, sus diferencias con el intervalo reciente (período 2001-2011).

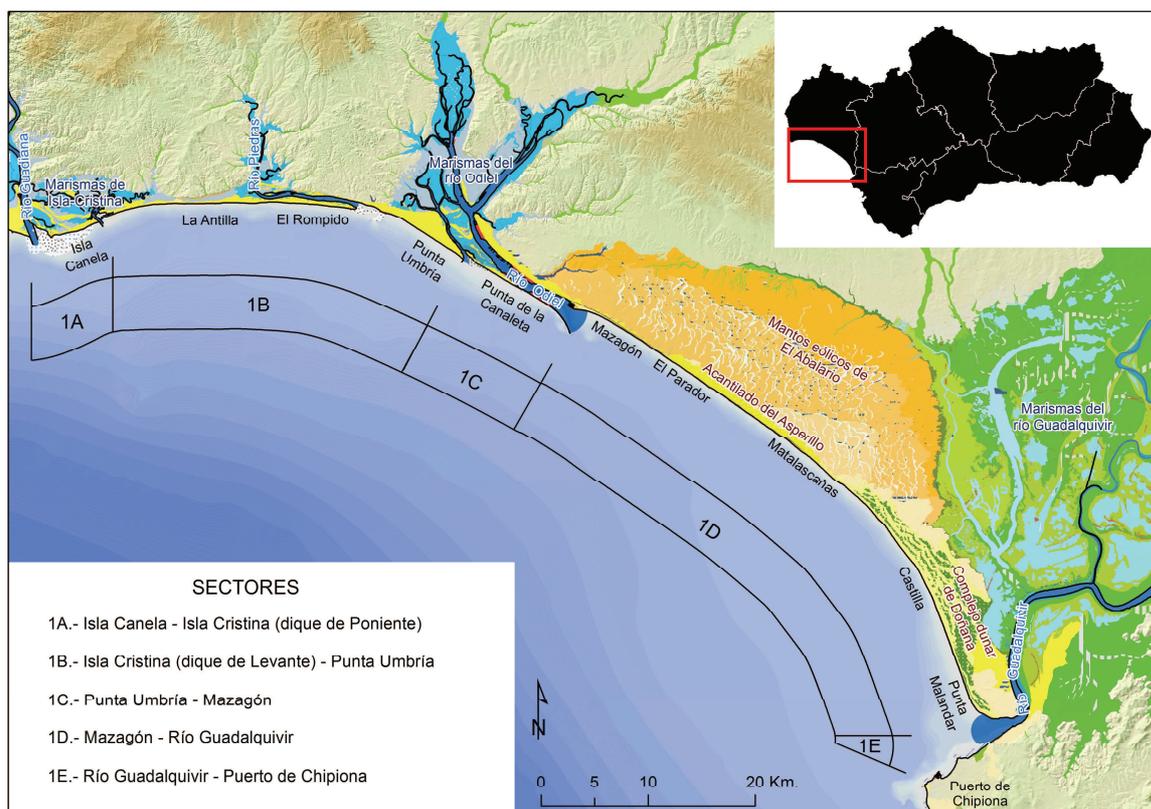


Figura 4.16. Sectores identificados en el Tramo río Guadiana-puerto de Chipiona para la interpretación de las tasas de erosión.

Fuente: elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES DE DATOS

Si bien la obtención, descripción y análisis detallado de las fuentes de información utilizadas puede ser consultada en el Capítulo 3 de esta Tesis Doctoral, en este apartado se realizará un análisis pormenorizado de los principales problemas encontrados en las fuentes de información para la interpretación del *proxy* utilizado. A continuación se presentan las fuentes de datos usadas en el análisis multitemporal de las tasas de erosión, en función a las características de resolución (espacial, espectral y radiométrica), desfase temporal y disponibilidad de las mismas (ver Tabla 4.2).

⇒ Vuelo Americano 1956-1957: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 1956 tiene las siguientes características en este Tramo:

- Resolución: con un **tamaño de píxel de 1 m.**, constituye la fuente de datos con menor resolución espacial de las utilizadas para la interpretación de los resultados. Se trata de una ortofotografía en **pancromático**, registrando problemas de **saturación en zonas de alta reflectividad**, siempre coincidentes con medio arenosos no consolidados, destacando los tramos de la flecha litoral de El Rompido y del complejo dunar de Doñana.
- Desfase temporal: se advierten problemas de **incompatibilidad de perfiles dinámicos** de las playas relacionadas con el desfase temporal de las secciones, al mostrar un perfil reflexivo en la sección Guadiana-Odiel (área volada en verano de 1956) tendente a uno disipativo en la sección contigua (tomada en otoño/invierno de 1956).
- Disponibilidad: la ortofotografía presenta **graves deficiencias de precisión geométrica** que han supuesto la exclusión del análisis de aquellas **secciones costeras que no disponen de información espacial** o que presentan deformaciones no corregidas en el proceso de ortorrectificación, como son la desembocadura del río Odiel o el complejo dunar de Doñana, respectivamente, **descartando un total de 10 Km. de costa.**

⇒ Vuelo IRYDA 1977-1983: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 1977 tiene las siguientes características:

- Resolución: obtenida a un **tamaño de píxel de 0,5 m.**, constituye una fuente de datos de alta fiabilidad en un período estratégico, entre la Ortofotografía histórica de 1956 y las actuales iniciadas en 1998. Se

trata también de una ortofotografía derivada de un vuelo **pancromático**, si bien se advierten, al igual que en la anterior, **problemas de saturación en zonas de alta reflectividad**, como en la flecha de El Rompido y playa de La Bota, o en zonas de escaso contraste, como en la playa de Castilla.

- Desfase temporal: **no existe desfase temporal**, aunque la ocurrencia de eventos meteorológicos excepcionales previos próximos a la fecha de vuelo han generado la rotura total de la barra arenosa de Punta del Moral, generando *washover fans* aún reconocibles en la actualidad. La continua llegada de barras submarinas a la costa indica un perfil de adaptación.
- Disponibilidad: se cuenta con la **total disponibilidad** de ortofotografías para el levantamiento de datos, sin aspectos notables a resaltar.

⇒ Vuelo 2001-2002: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 2001 tiene las siguientes características:

- Resolución: obtenida a un **tamaño de píxel de 0,5 m.**, supone la primera fuente de datos actual de precisión submétrica. Al igual que las anteriores, procede de un vuelo **pancromático**, sin inconvenientes radiométricos a resaltar.
- Desfase temporal: la proximidad de temporales cercanos a la fecha de estudio (febrero de 2003) ha provocado una clara **incompatibilidad de perfiles dinámicos**, generando un paisaje de perfiles disipativos a lo largo del subtramo Guadiana-Matalascañas (volada en invierno/primavera de 2003), dando lugar a playas con perfiles mayoritariamente reflexivos como así se muestran las playas del subtramo Matalascañas-puerto de Chipiona (tomada en verano de 2002).
- Disponibilidad: presenta **zonas parcheadas** vinculadas a la presencia de áreas militares de valor estratégico impidiendo el correcto levantamiento de datos y, por tanto, siendo excluidas del análisis cuantitativo. Es el caso del Médano del Loro, entre los términos municipales de Almonte y Lucena del Puerto, el cual **supone la exclusión de 3 Km. de litoral**.

⇒ Vuelo digital 2010-2011: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 2011 tiene las siguientes características:

- Resolución: se contempla como la fuente de datos más fiable del presente trabajo de investigación desde el punto de vista de la resolución espacial (**0,5 m.**) y espectral (**color + IRC**). No se observan inconvenientes radiométricos a resaltar.
- Desfase temporal: existe **desfase temporal** entre el sector Guadiana-Matalascañas (fotografiado en verano de 2011) y el sector Matalascañas-puerto de Chipiona (volado en verano de 2010, al igual que la totalidad de la costa andaluza). Por lo tanto, **no refleja incompatibilidad en los perfiles dinámicos** de las playas, al presentar un perfil reflexivo no consolidado en ambas fechas, debido a la intensidad de los temporales sufridos durante los inviernos de ambos años.
- Disponibilidad: se cuenta con la **total disponibilidad** de ortofotografías para el levantamiento de datos, sin aspectos notables a resaltar.

Ortofotografía	Inconvenientes resolución	Desfase temporal	Disponibilidad
1956 -1957	Espacial: 1 metro	<i>Río Guadiana-río Odiel: verano 1956</i> <i>Río Odiel-río Guadalquivir: otoño/invierno 1956</i>	<i>Falta de información en desembocadura de los ríos Tinto-Odiel.</i> <i>Deformación geométrica en Doñana.</i> <i>Excluidos 10 Km.</i>
	Esppectral: <i>pancromático</i>		
	Radiométrica: <i>saturación</i>		
1977 -1983	Espacial: 0,5 metros	<i>No existe desfase temporal.</i> <i>Verano 1977</i>	<i>Total disponibilidad para el ámbito del Tramo 1.</i>
	Esppectral: <i>pancromático</i>		
	Radiométrica: <i>saturación</i>		
2001-2002	Espacial: 0,5 metros	<i>Río Guadiana-playa de Matalascañas: invierno/primavera 2003</i> <i>Playa de Matalascañas-puerto de Chipiona: verano 2010</i>	<i>Falta de información en Médalo del Loro.</i> <i>Excluidos 3 Km.</i>
	Esppectral: <i>pancromático</i>		
	Radiométrica: <i>sin aspectos a resaltar</i>		
2010-2011	Espacial: 0,5 metros	<i>Río Guadiana-playa de Matalascañas: verano 2011</i> <i>Playa de Matalascañas-puerto de Chipiona: verano 2010</i>	<i>Total disponibilidad para el ámbito del Tramo 1.</i>
	Esppectral: <i>color + IRC</i>		
	Radiométrica: <i>sin aspectos a resaltar</i>		

Tabla 4.2. Principales características e inconvenientes de las fuentes de datos utilizadas para el Tramo 1.

Fuente: elaboración propia.

TASAS DE EROSIÓN PARA EL PERÍODO DE REFERENCIA 1977-2011

El patrón de los tramos erosivos y acumulativos es bastante consistente con las características dinámicas del área (presencia de una importante deriva longitudinal) y el efecto de las alteraciones antrópicas introducidas a partir del año 1977 (ver Figura 4.17 – Anexo 3A).

Sector 1A. Río Guadiana-Isla Cristina

En este sector se aprecian los efectos de los recientemente construidos diques dobles en la desembocadura del río Guadiana y los diques de acceso al puerto de Isla Cristina.

En la **sección intradiques** (Isla Canela-Punta del Moral), se aprecian amplios **sectores acumulativos** (centro y extremos) y **erosivos** (sectores intermedios) debido a la modificación de los bajos asociados al delta submarino que, al “reorientar” el oleaje según su cambiante ubicación provocan que algunos sectores se erosionen y otros prograden. Este delta submarino es reducto del original en su lento pero inexorable proceso de avance y anexión a las playas emergidas de Isla Canela (Ojeda, 2005).

Por otra parte, la construcción del **dique de Poniente** de Isla Cristina ha generado efectos de **acumulación** de gran importancia en su sector occidental (favorecido por la deriva litoral), los cuales han conseguido colmatar la brecha abierta en la isla barrera provocada por un reciente temporal tal y como refleja la Ortofotografía de 1977.

Sector 1B. Isla-Cristina-Punta Umbría

En este sector, la construcción del **dique de Levante** en Isla Cristina ha favorecido también la **acumulación** en la sección oriental de la desembocadura de la ría Carreras, debido al efecto de sombra respecto al oleaje incidente y a la migración del antiguo delta submarino de la ría Carreras, conformando una nueva isla barrera y un pequeño *lagoon*.

La sección desde **Isla Cristina** (tras el tramo acumulativo anterior –playa del Hoyo-) al **sector distal de la flecha del Rompido** presenta una **erosión más o menos generalizada** debido al déficit sedimentario creado por la acción combinada de los diques del sector anterior, siendo mayor en la sección inmediata al cese del efecto de los diques de acceso al puerto de Isla Cristina (playa de la Redondela). En algunos sectores, el cálculo de las tasas de erosión para 2011 se ve debilitado por el uso del *proxy* (contacto

backshore-foredune) y la ocupación urbana de la playa (por ejemplo en el núcleo de La Antilla), que impide la migración hacia el interior de la línea de costa.

En la sección asociada al **tramo distal de la flecha del Rompido**, se aprecia un proceso de erosión del cuerpo central de la flecha, la cual la deriva litoral ha hecho **progradar hacia el este** ya que, a pesar del déficit sedimentario anterior, la deriva ha logrado recuperar la carga sólida en todas las playas situadas a poniente del extremo distal de la flecha, por lo que el crecimiento de la flecha (casi 1200 m. durante el período de referencia) y de los bajos asociados a su delta submarino ha continuado como lo ha hecho históricamente (Ojeda y Vallejo, 1995).

La importante progradación de la flecha y los bajos asociados tienen un efecto múltiple en las playas frente a ellos:

- ⇒ efecto erosivo intenso (playa de El Portil) al erosionar el oleaje y el canal de salida del estuario del río la zona acumulativa en la ortofotografía de 1977, entonces protegida por los bajos asociados al extremo distal de la flecha,
- ⇒ efecto acumulativo (playa de La Bota) en el sector ahora protegido por la migración de los mismos bajos en la ortofotografía de 2011 y
- ⇒ efecto erosivo leve en las playas situadas a continuación de las mencionadas, donde la deriva recupera la carga sólida (entre la playa de La Bota y comienzo de la playa de Los Enebrales).

En las playas asociadas a la **flecha de Punta Umbría**, situadas a continuación, se advierte una zona con tendencia estable tendente a la acumulación (cuerpo central de la flecha) y una **zona claramente acumulativa** en el extremo más oriental de la flecha forzada por el efecto barrera del dique de acceso a la ría de Punta Umbría.

Sector 1C. Punta Umbría-Mazagón

En este sector, asociado al estuario de los ríos Tinto y Odiel, es posible encontrar 3 secciones diferentes: 2 secciones progresivas y 1 erosiva.

La primera **sección progresiva** se asocia al importante efecto de barrera de **espigón Juan Carlos I** (ya en construcción en el año 1977). La segunda, al este del **Puerto de Mazagón** (año 1975), donde se genera una deriva local dominante hacia poniente (producida por la protección del dique Juan Carlos I) cuyos sedimentos se **acumulan por el efecto barrera** del mismo puerto.

La **sección erosiva** se corresponde con las **playas de Mazagón**, y está causada por la finalización del efecto sombra que ejerce el dique Juan Carlos I (Flores et al., 1997; Rodríguez, 1999) al oleaje dominante del tercer cuadrante y la exposición de estas playas a la deriva local antes citada, animada por el oleaje de levante, dominante exclusivamente en este punto.

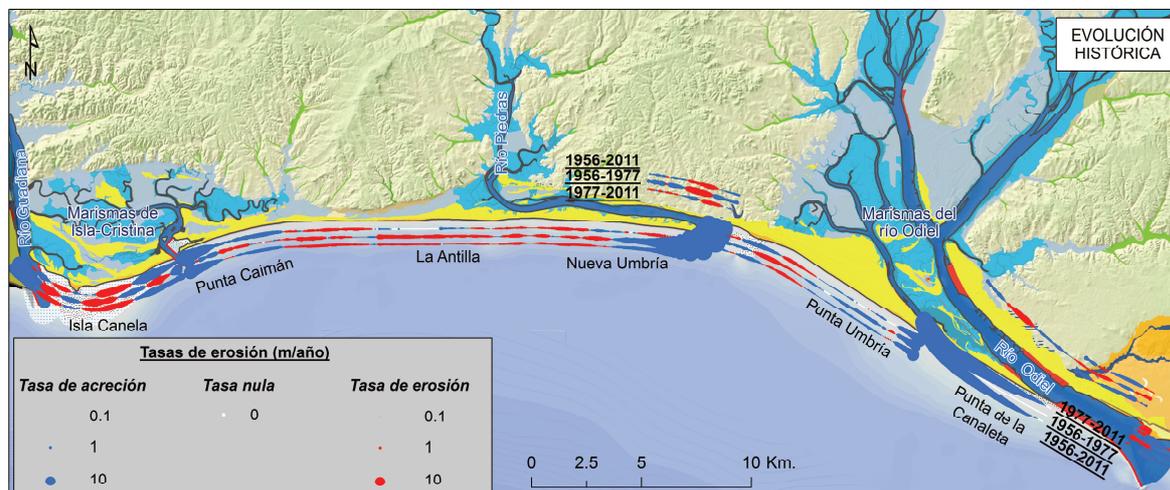


Figura 4.17. Tasas de erosión históricas para los sectores A, B y C del Tramo 1 (ver Anexo 3A). Fuente: elaboración propia.

Sector 1D. Mazagón-río Guadalquivir

En este sector es posible identificar 3 secciones diferentes: Mazagón-Matalascañas, Matalascañas-río Guadalquivir y tramo distal de la flecha-contacto con la margen izquierda del río Guadalquivir (ver Figura 4.18 – Anexo 4A).

En la sección **Mazagón-Matalascañas**, **históricamente erosiva** como demuestra su morfología acantilada con una altitud media de 20 m., las tasas de erosión calculadas bidimensionalmente deben ser tratadas con especial cuidado. En pequeños sectores, las tasas pueden ser positivas debido a la acumulación de sedimentos que la arroyada superficial y a los deslizamientos favorecidos por el material altamente deleznable (antiguos mantos eólicos). No obstante, en general, el sector es regresivo, efecto intensificado por el aislamiento sedimentario provocado por el dique de Juan Carlos I.

En el caso de la sección **Matalascañas-río Guadalquivir**, la **histórica progradación** de la flecha de Doñana, además de cerrar la antigua bahía, reorienta hacia el sur el trazado de la costa, debilitando progresivamente la capacidad de transporte de la deriva litoral y favoreciendo la acumulación. El resultado del mismo es un tradicional sector progresivo, aunque en la actualidad sólo puede alimentarse de los sedimentos erosionados en el acantilado del Asperillo.

Por último, la sección correspondiente al **tramo distal de la flecha (Punta de Malandar)** y su contacto con la **margen izquierda del Guadalquivir** constituye la **sección más activa y cambiante**, ya que a la llegada de sedimentos se une la dinámica fluctuante del canal del estuario, alternando sectores acumulativos claramente dominantes con procesos erosivos puntuales.

Sector 1E. Río Guadalquivir-puerto de Chipiona

Como se apuntó con anterioridad, este sector se ha incluido en este primer Tramo (río Guadiana-puerto de Chipiona) ya que, aunque la conexión con los sedimentos procedentes de la costa de Huelva parece difícil en la actualidad, su evolución reciente ha estado asociada a la propia dinámica fluctuante del canal del estuario del río Guadalquivir. En este sentido puede apuntarse que, aunque **históricamente** esta sección ha sido **progresiva** (como demuestra la progradación desde la línea marcada por el acantilado flamenco relicto, claramente reconocible en el casco histórico de Sanlúcar de Barrameda) y, aunque las tasas recientes reflejan también sectores progresivos, existen **importantes espacios erosivos** en la proximidad del **puerto de Chipiona**.

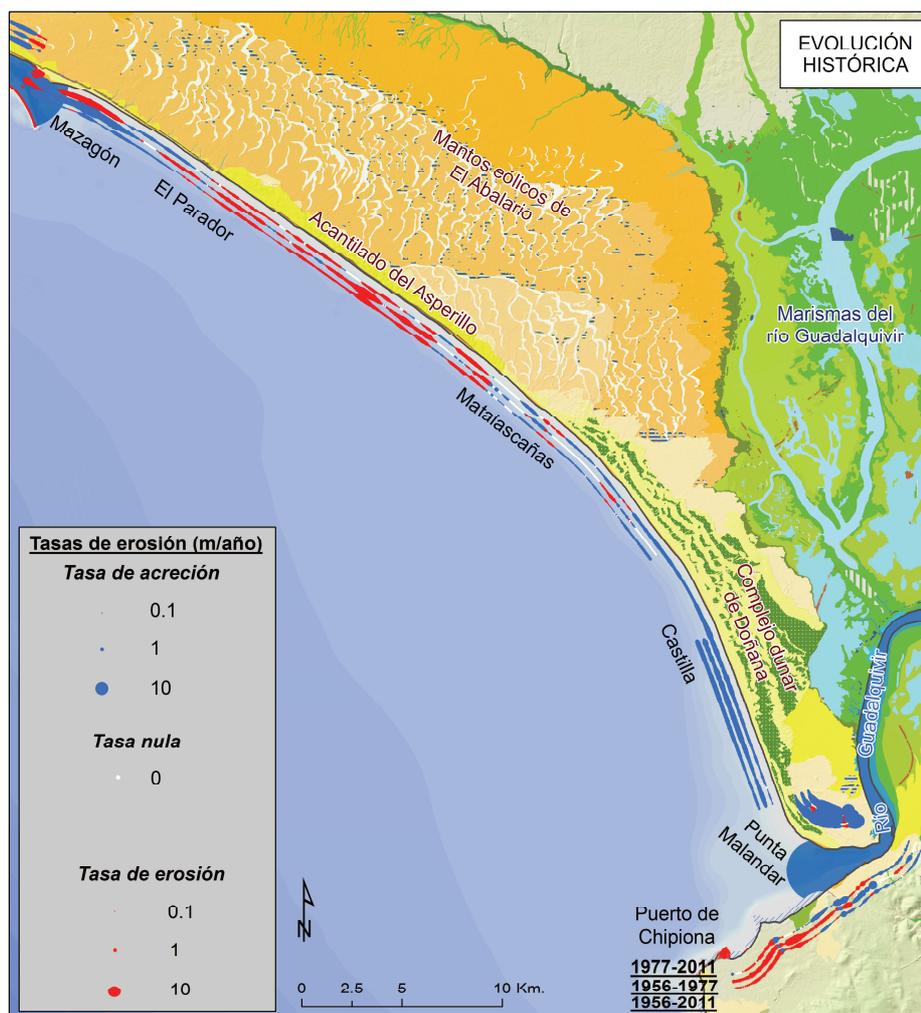


Figura 4.18. Tasas de erosión históricas para los sectores D y E del Tramo 1 (ver Anexo 4A). Fuente: elaboración propia.

DIFERENCIAS ENTRE LAS TASAS DE EROSIÓN ENTRE LOS PERÍODOS 1956-1977 Y 1977- 2011

Las deficiencias en la geometría (dificultades para la generación de la ortofotografía) y la escasa calidad radiométrica y espacial de la ortofotografía de 1956 han motivado que sólo sean marcadas las principales diferencias entre las tasas calculadas para ambos períodos, es decir, aquellas que puedan constatar inequívocamente. Como puede apreciarse en las Figuras 4.17 y 4.18, el patrón general para el período 1956-1977 sigue pautas parecidas al de referencia (1977-2011). No obstante, presenta singulares diferencias, principalmente vinculadas a que en este intervalo la mayor parte de las principales alteraciones antrópicas al tránsito longitudinal no estaban construidas y prácticamente toda la **costa onubense** constituía una **única unidad fisiográfica**, incluso prolongada a las playas de las islas-barrera del Algarve, como ya se detalló al comienzo del apartado.

En primer lugar, la simple inspección visual de este Tramo en 1956 revela la abundancia de sedimentos en la costa, lo cual es de cierta lógica por varios motivos:

- ⇒ El río Guadiana, principal fuente puntual de sedimentos, se encontraba, sobre todo en su tramo inferior, exento de regulación hidrológica en su cuenca.
- ⇒ Está constatado por diferentes estudios que, en este período, se produce una disminución de la protección del suelo por la vegetación y el consiguiente incremento de la erosión en la cuenca debido al aumento de la demanda de tierra para cultivo e intensificación de la ganadería (CMAOT, 2009).
- ⇒ No había interferencia a la dinámica litoral y, tanto los sedimentos aportados por el río Guadiana como los procedentes del Algarve, conseguían pasar las desembocaduras de los estuarios (Ojeda, 1988a; Morales y Borrego, 2008) e incluso llegar hasta el Asperillo y la flecha de Doñana, transportados por la deriva dominante.

Las principales diferencias se observan en los siguientes sectores:

Sector 1A. Río Guadiana-Isla Cristina

En este sector, obviamente, se recogen los principales cambios en el frente litoral debido a la reciente construcción de los diques de la desembocadura del río Guadiana y de acceso al puerto de Isla Cristina (construidos en los primeros años de la década de 1970 y, por lo tanto, recogidos en la Ortofotografía de 1977).

Por lo tanto, al principio de este período, está comenzando la **reestructuración del frente de Isla Canela**, al quedar aislado de los sedimentos que franqueaban el río Guadiana desde el Algarve y parte de los que aporta el propio río. El efecto observado se corresponde con el inicio de la migración del delta submarino, ahora aislado entre diques, hacia la playa emergida de Isla Canela, con una continua reestructuración de los bajos que enfocan el oleaje en 3 secciones: **erosión de la parte central e intermedia, progradación del extremo de la contraflecha** que cierra el río Guadiana y **acumulación junto al dique de Poniente** del puerto de Isla Cristina, cuyos resultados se ven alterados por la rotura de la barra arenosa de Punta del Moral como consecuencia de un temporal previo cercano a la fecha de vuelo de la Ortofotografía de 1977.

Por otro lado, se observan incipientes **tendencias acumulativas** en el sector localizado a la sombra del **dique de Levante** de Isla Cristina e inicios de migración hacia el mismo de los bajos arenosos asociados al delta de reflujos de la ría Carreras.

Sector 1B. Isla Cristina-Punta Umbría

Los principales cambios experimentados en este sector están vinculados a la **erosión** de las playas situadas a continuación de los efectos de los diques antes mencionados por la interrupción de sedimentos en los mismos y a la recuperación de la carga sólida en este sector (**playas del Hoyo, Redondela y La Antilla**), propiciando un claro retroceso de la línea de costa.

El otro cambio significativo está asociado a la dinámica, entre estas fechas, de los sectores afectados por la **progradación de la flecha de El Rompido**. El efecto de la progradación de la flecha de El Rompido (700 m. para este período, aproximadamente) y los bajos asociados a la desembocadura del río Piedras provocan un efecto múltiple en las playas frente a ellos, parecido al comentado en el período anterior, pero desplazados hacia el oeste al tratarse de fechas anteriores:

- ⇒ **Efecto erosivo** intenso (**oeste de la playa de El Portil**) al erosionar el oleaje y las corrientes de salida del estuario la zona acumulativa en la foto de 1956, por la protección de los bajos asociados a extremo distal de la flecha.
- ⇒ **Efecto acumulativo** (**este de la playa de El Portil**) en el sector ahora protegido por los mismos en la ortofotografía de 1977.
- ⇒ **Efecto erosivo** leve en las playas situadas a continuación del anterior donde la playa la deriva recupera la carga sólida (**entre la playa de El Portil y comienzo de la playa La Bota**).

Por último, el sector asociado a las playas de la **flecha de Punta Umbría** presentan, como era esperable, un **comportamiento progradante** que se extiende hacia levante por la consolidación de algunos de los **bajos** asociados al amplísimo delta del estuario del Tinto-Odiel, los cuales, a su vez, **hacen progradar las playas de Mazagón** por la protección que éstos le proporciona.

Sector 1C. Punta Umbría-Mazagón

Los resultados para este período han de ser tomados e interpretados con cautela, ya que el espigón **Juan Carlos I, en fase de construcción** en la Ortofotografía de 1977, muestra una barra arenosa en ciernes, caracterizada por pequeños **reductos sedimentarios aislados y sin consolidar**, cuyo esquema de deposición está regido por las condiciones dinámicas de la zona.

Por su parte, **la sección anterior al puerto de Mazagón describe un comportamiento alternante** entre tasas erosivas y acumulativas, propias de áreas de dinámica compleja, como es, en este caso, la desembocadura de los ríos Tinto-Odiel.

Sector 1D. Mazagón- río Guadalquivir

Dada la ausencia de los efectos del espigón Juan Carlos I (en fase de construcción en 1977), las tendencias en este período son las esperadas en función de la dinámica. Por una parte, se produce **erosión generalizada en el sector acantilado del Asperillo** aunque con tasas menores debido a la leve interconexión sedimentaria que todavía permite la construcción del dique a través del estuario del Tinto-Odiel. Por otra, se produce **acumulación desde Matalascañas hasta la desembocadura del río Guadalquivir**. En el extremo distal de la Flecha de Malandar se observa acumulación, aunque también hay presencia de sectores erosivos por la proximidad y dinámica del cauce del Guadalquivir.

Sector 1E. Río Guadalquivir-puerto de Chipiona

En este sector es importante hacer constar el significativo proceso erosivo que se produce en todo el tramo entre la población de Sanlúcar de Barrameda y el puerto de Chipiona, con **tasas de regresión muy elevadas** que, en algunos casos, han supuesto la pérdida de parcelas completas lindantes con la costa.

DIFERENCIAS ENTRE LAS TASAS DE EROSIÓN DE LOS PERÍODOS 2001-2011 Y 1977-2011

La elección de este último período, el más reciente para la evolución de este Tramo, es revelador de los efectos de continua **ocupación antrópica del litoral**, así como de la influencia que actualmente tienen un nuevo tipo de alteraciones antrópicas, vinculadas a un cambio en la estrategia seguida por la Administración Pública competente hacia la utilización de **medidas blandas** (regeneración de playas y restauración de dunas costeras, principalmente).

Estos hechos (aportes externos –regeneración-, ocupación antrópica de la costa –dificultad para la interpretación del *proxy*-, etc.), hacen aún más difícil la correcta interpretación de las tasas. En este sentido, en la costa de Huelva se resaltan los siguientes hechos para este período (ver Figura 4.19 – Anexo 3B):

Sector 1A. Río Guadiana-Isla Cristina

Este sector refleja los cambios de la continua migración del delta submarino del río Guadiana hacia el frente costero de Isla Canela (Ojeda, 1988a y Morales y Borrego, 2008), con la consiguiente reestructuración de los bajos arenosos que, modificando el patrón del oleaje en secciones concretas, remodelan la morfología del frente costero, en continuo cambio. El resultado de este proceso en este intervalo que incluye los 10 últimos años (2001-2011) del período de referencia (1977-2011) es la presencia de un **comportamiento erosivo importante**, especialmente **en el sector occidental** de la playa de Isla Canela, así como la **estabilización del sector central** por la presencia de paseos marítimos y la construcción de una escollera que fija la costa en el sector oriental del complejo urbano. Se observan **escasos sectores de acumulación** en el sector apoyado en el **dique de Poniente** de Isla Cristina.

Sector 1B. Isla Cristina-Punta Umbría

En este sector se observa cómo, tras haberse completado la **migración de los antiguos bajos asociados a la desembocadura del río Carreras** (con la consolidación de una isla barrera y un *lagoon*) hacia el núcleo de Isla Cristina en el sector oriental del dique de Levante, se produce un cambio de tendencia en este sector históricamente acumulativo hacia **incipientes procesos de erosión**.

Otros cambios registrados en este sector se vinculan a un **relativo éxito** de los trabajos de **regeneración de playas y restauración de dunas en el antiguo sector erosivo hasta el núcleo de Urbasur** (playas del Hoyo y La Redondela) ahora ligeramente progresivo. Este hecho contrasta con el **fracaso** de idénticas medidas llevadas a cabo **desde Islantilla hasta La Antilla**, donde continúan los procesos erosivos al recuperar en estos sectores la deriva dominante hacia levante la carga sedimentaria.

Por otro lado, continúa, profundamente ralentizada, la **progradación de la flecha de El Rompido** (que escasamente supera los 100 m. en este período) y sus efectos en las playas adyacentes. Esta ralentización está también vinculada a la intensificación de la presión antrópica sobre la desembocadura del río Piedras y los bajos asociados a la flecha (incremento de navegación deportiva, dragados sistemáticos, etc.). Aún así se observa el mismo patrón sobre las playas frente a la flecha y bajos: **erosión en los sectores anteriormente protegidos por la flecha en 2001** (playas entre El Portil y sector occidental de La Bota), debido al alargamiento del cauce del río Piedras durante este período por la progradación, ahora principalmente de los bajos asociados;

acumulación en el sector oriental de la playa de La Bota y erosión en las playas siguientes (en el sentido de la deriva litoral).

Por último, se registra una **acumulación**, ahora muy concentrada, **en el tramo distal de la flecha de Punta Umbría**, coincidente con las proximidades del dique, aunque se ha llevado a cabo labores de restauración de dunas en la mayor parte de extremo proximal de la flecha.

Sector 1C. Punta Umbría-Mazagón

Las tasas revelan una **continua progradación de Isla Saltés**, aunque menos intensa que en períodos previos. Destaca la aparición de una sección erosiva en el cuerpo proximal de la barra arenosa, coincidente con la zona litoral donde el oleaje dominante del tercer cuadrante incide de forma directa. La movilización de sedimentos se produce a ambos lados de la barra, como consecuencia de dos factores:

- ⇒ Deriva litoral predominante hacia levante, la cual empuja los sedimentos hacia el extremo distal oriental de la barra, unida al dique Juan Carlos I.
- ⇒ La cercanía de la ría de Punta Umbría, afectada por intensos procesos de flujo y refluo mareal, unida a una deriva litoral puntual procedente del cuarto cuadrante, empujan los sedimentos hacia el extremo distal occidental, depositándolos en el sector estuarino de la misma.

La **sección litoral protegida, anterior al puerto de Mazagón**, arroja **resultados erosivos** de carácter leve, debido al retranqueo de la línea de costa durante los años intermedios del intervalo de análisis, aún perdurables durante el último año de estudio.

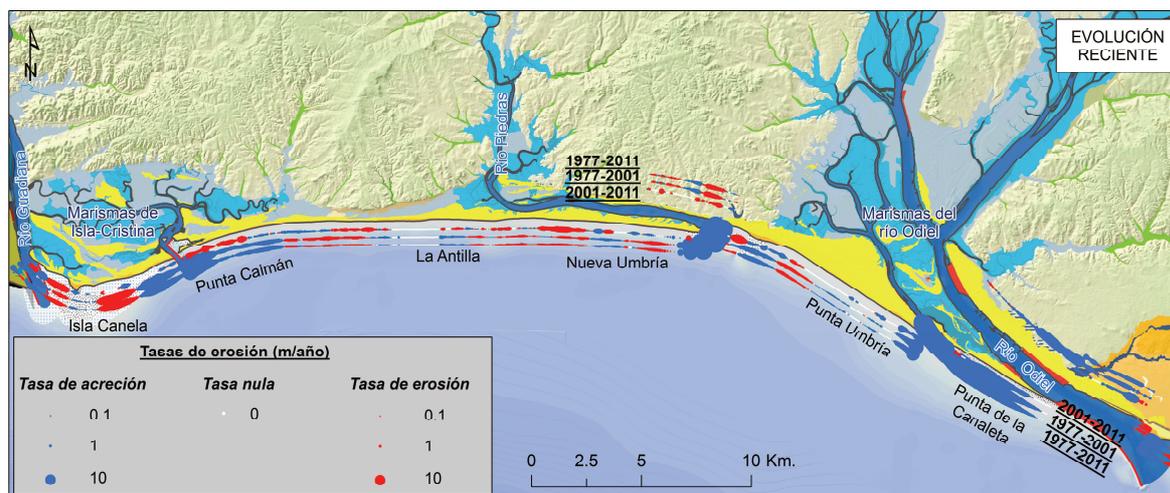


Figura 4.19. Tasas de erosión recientes para los sectores A, B y C del Tramo 1 (ver Anexo 3B).
Fuente: elaboración propia.

Sector 1D. Mazagón-río Guadalquivir

En este período se siguen constatando los efectos de la retención de sedimentos del dique Juan Carlos I y las tendencias son las esperadas en función de la interacción de este hecho con la dinámica litoral de la zona (ver Figura 4.20 – Anexo 4B). Por un lado, se identifican **sectores acumulativos asociados al efecto de barrera del puerto de Mazagón** (construido en 1975), alimentados por la deriva local hacia el oeste creada por el efecto sombra del dique Juan Carlos I, la cual también es causa de las actuales tendencias erosivas sobre las playas de la urbanización de Mazagón, ahora claramente expuesta a los temporales de levante. Avanzando hacia el este, se observa una **tendencia regresiva generalizada en el sector acantilado del Asperillo**, con importantes tasas próximas a Matalascañas. A partir de aquí, se produce una **acumulación ralentizada hasta la desembocadura del río Guadalquivir**, con algunos sectores erosivos en las zonas más próximas a la urbanización, así como en el extremo distal de la flecha del Malandar, en pleno contacto con el cauce del río Guadalquivir.

Sector 1E. Río Guadalquivir-puerto de Chipiona

En este sector se constatan **procesos erosivos en la playa de Sanlúcar de Barrameda** (debidos a la reestructuración del paseo marítimo), así como **tendencias acumulativas en el sector occidental** y la **ralentización/estabilización** de las secciones otrora erosivas en las **proximidades del puerto de Chipiona**.

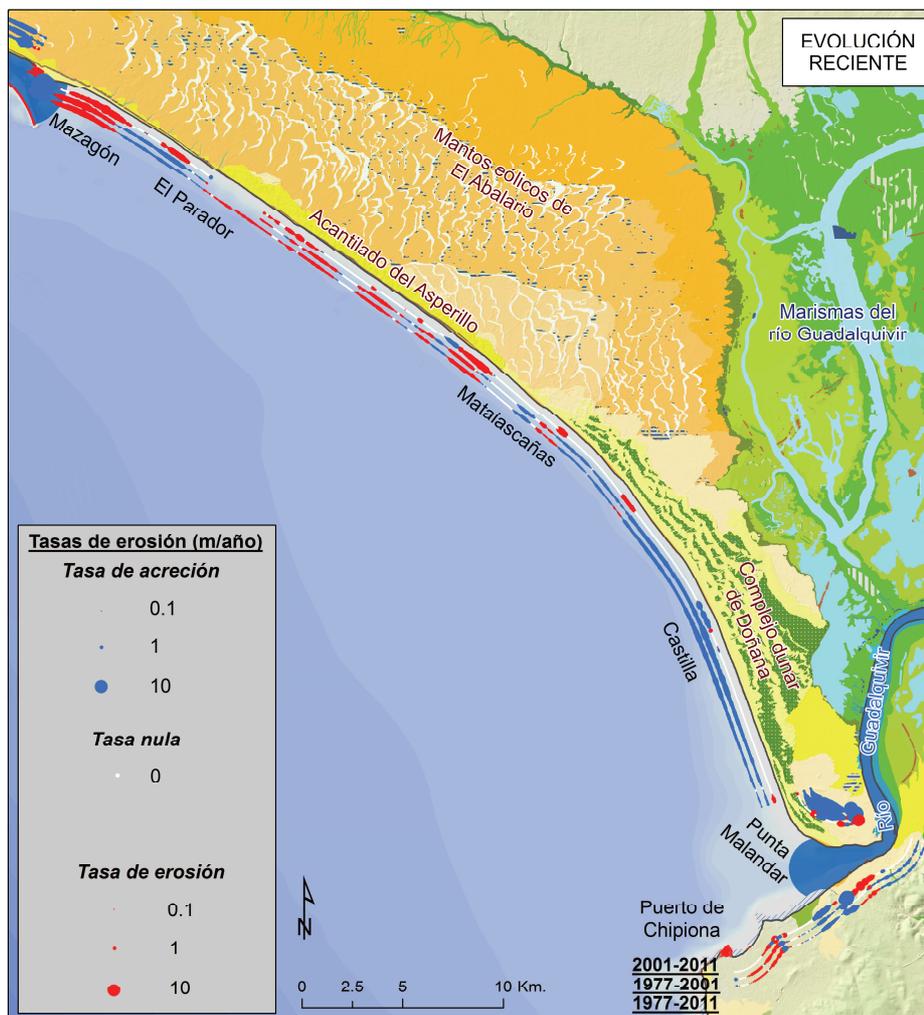


Figura 4.20. Tasas de erosión recientes para los sectores D y E del Tramo 1 (ver Anexo 4B). Fuente: elaboración propia.

4.2.4. TRAMO 5: CASTELL DE FERRO-CABO DE GATA

4.2.4.1. LÍMITES, EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA RECIENTE Y BALANCE SEDIMENTARIO.

LÍMITES

El **Tramo 5** describe el ámbito costero situado entre los acantilados previos a la población de Castell de Ferro y el Cabo de Gata, un sector costero de aproximadamente 120 Km. de longitud. Presenta una clara alineación este-oeste, lo que proporciona una longitud y orientación muy parecida a la del Tramo 1 aunque, en este caso, correspondiente a la fachada mediterránea de Andalucía, cuyas características (régimen micromareal, oleaje de menor *fetch*, deltas, albuferas...) le proporcionan un carácter complementario.

Para este Tramo se ha elegido como **límite occidental** los **acantilados sobre rocas coherentes** (esquistos, principalmente) a poniente de la población de **Castell de Ferro**, en la provincia de Granada. Este sector constituye una **barrera total** al tránsito sedimentario litoral también, como en la costa de Huelva, controlado por una deriva (es este caso menos potente) hacia levante. La razón está en la proximidad de las estribaciones de la Sierra de la Contraviesa y a la escasa amplitud y pendiente de la plataforma continental (batimetría de 10 m. a escasos metros de la línea de costa).

Como **límite oriental** se ha seleccionado el **Cabo de Gata** en la provincia de Almería. En este caso se trata de otra **barrera total** al tránsito sedimentario litoral, debido a la presencia de las estribaciones de la Sierra de Gata, sobre cuyos materiales de origen volcánico se configura un sector acantilado. A partir de este punto la costa andaluza gira bruscamente hacia el norte para prolongarse hacia la costa oriental de Almería, cuya alineación suroeste-nordeste configura otro tramo de costa con unas características del clima marítimo (oleaje y vientos dominantes) totalmente diferente.

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA RECIENTE

Como puede apreciarse en la Figura 4.21, este Tramo costero granadino-almeriense, como el resto de la actual configuración de la costa andaluza, tiene también su origen en el Máximo Transgresivo Flandriense vinculado a la última remontada del nivel del mar desde la posición que ocupó durante el descenso asociado al último período glacial (estadio isotópico 2), hace aproximadamente 18-20.000 años. Esta remontada del nivel del mar inundó las desembocaduras de los principales ríos y ramblas que fueron navegables en época histórica (quedando constancia en los yacimientos fenicios encontrados), así como modeló amplios tramos de costa acantilada por la proximidad de los sistemas béticos a la línea de costa o por la presencia de tramos tectónicamente emergentes como el Campo de Dalías. La actual disposición del frente costero responde al modelado por la dinámica litoral de los abundantes sedimentos que proporcionaban los ríos y ramblas. De esta forma, en la proximidad de las desembocaduras se desarrollan extensos deltas (Adra, Andarax...), a veces con albuferas asociadas, o una costa acantilada, puntualmente, con presencia de playas en su base. En algunos sectores con una dinámica compleja se forman espectaculares formaciones arenosas litorales (sur de Campo de Dalías) que, progresivamente, van convirtiendo en relictos e inactivos los acantilados asociados a la Transgresión Flandriense.

La evolución geomorfológica reciente en los últimos 6.000 años ha generado, por lo tanto, una costa totalmente diferente a la descrita en el Tramo 1, ligada al proceso de **regularización costera** por el desarrollo de diferentes tipos de formaciones arenosas litorales:

- ⇒ Playas y dunas costeras asociadas a **deltas** desarrollados en las desembocaduras de ríos y ramblas (Albuñol, Adra, Andarax...) con una alta capacidad erosiva al drenar cuencas de elevada pendiente por la proximidad de los relieves béticos (Ojeda, 2003).
- ⇒ **Formaciones arenosas complejas (sistemas de playa-duna progradantes y flechas litorales)** desarrolladas al sur de los antiguos acantilados flandrienses en el sector meridional de Campo de Dalías, que ocupan una amplísima superficie (40 Km. de costa desde Balanegra a Roquetas de Mar, penetrando hacia el interior hasta 1,5 Km.). Son formaciones complejas, ya que es un sector donde no avenan ríos por la basculación hacia el Norte de todo este sector, emergente tectónicamente (Marín, 2005), y por desarrollarse ante ellas una plataforma continental singularmente amplia, con abundancia de sedimentos arenosos. La configuración Este-Oeste y la convexidad hacia el sur ha hecho que las derivas sean cambiantes históricamente favoreciendo la formación de sistemas de playa-duna progradantes y/o flechas litorales sometidas a una dinámica litoral activa pero muy oscilante en las direcciones dominantes del oleaje y, consecuentemente, de los sectores progradantes y erosivos.
- ⇒ Playas de gran amplitud asociadas al desarrollo de **cordones litorales progradantes**, apoyados en antiguas terrazas marinas en el sector oriental de la Bahía de Almería, donde la deriva hacia levante va perdiendo intensidad (por la orientación de la costa) hasta llegar a Cabo de Gata.
- ⇒ **Formaciones arenosas ligadas a la dinámica eólica**, desarrolladas sobre todos los sectores progradantes de las formaciones litorales antes comentadas (Campo de Dalías, Bahía de Almería...).

La intensidad de los aportes de carácter puntual y espasmódicos de los ríos y ramblas, así como el desarrollo de las formaciones litorales en los sectores progradantes (deltas, Campo de Dalías, sector occidental de Cabo de Gata), permitieron el desarrollo de **sistemas de albuferas** con una conexión esporádica o por filtración con las aguas marinas, lo cual es otra característica de este sector, representativas del carácter

micromareal del Mediterráneo y complementarias de la formaciones de marismas mareales que se desarrollan en el tramo Atlántico.

Esta situación ha sido profundamente modificada por las **alteraciones antrópicas**, que ha sufrido este sector, con peculiaridades respecto al tramo atlántico antes comentado (detracción de arenas de playas y dunas para el extendido uso de invernaderos en la zona), además de las clásicas intervenciones en las cuencas (regulación) e infraestructuras costeras (puertos, espigones, muros defensa, etc.).

BALANCE SEDIMENTARIO

De forma previa al comentario del balance sedimentario de este Tramo (ver Figura 4.21), con carácter general, puede afirmarse que se trata de una costa micromareal (rango de marea inferior a 1 m.) donde es destacable la existencia, casi para todo el Tramo, de una **deriva litoral** que presenta, generalmente, una componente energética positiva hacia **levante**, debido a la oblicuidad de los frentes del oleaje dominante del tercer cuadrante. En algunos sectores locales protegidos de este componente pueden desarrollarse derivas dominantes en sentido opuesto (Roquetas de Mar, sector occidental del delta del río Andarax).

Las características del oleaje no sólo vienen determinadas por el régimen de vientos (dominancia del tercer cuadrante, pero con cierta importancia del oleaje de levante), sino también por la presencia próxima del continente africano, lo que origina un oleaje de fondo de menor *fetch* y energía media si lo comparamos con el sector Atlántico. Es también este proceso litoral, la deriva dominante hacia levante, muy sensible a la orientación de la costa respecto al oleaje incidente, el elemento clave para entender la evolución de las playas de todo este Tramo.

En relación a los **inputs sedimentarios (entradas de sedimentos al sistema playa)**, destacan:

- ⇒ **Aportes puntuales:** El principal *input* sedimentario todo el Tramo hasta Cabo de Gata lo constituyen las aportaciones de los **principales ejes fluviales** (ríos y ramblas) que avanan hacia este sector costero (Albuñol, Adra, Andarax).
- ⇒ **Aportes zonales:**
 - **Sectores erosivos sobre las formaciones arenosas litorales**, (deltas, formaciones arenosas del Campo de Dalías, etc.) y, en menor medida y de forma puntual, los sectores acantilados.

- Aunque es difícil de cuantificar, los aportes de la **zona antelitoral sumergida** ha debido constituir una importante fuente de sedimentos para el sector del Campo de Dalías, dada la ausencia de ríos que avenan este sector y la magnitud de las formaciones arenosas desarrolladas. La presencia de importantes praderas de posidonia y su importancia en relación a la producción de sedimentos detríticos también deben de constituir en la actualidad una potencial fuente de sedimentos.

En relación a los **outputs sedimentarios (salidas de sedimentos del sistema playa-duna costera)** destacan:

- ⇒ Salidas de sedimentos asociadas a la propia **dinámica progresiva de las formaciones arenosas litorales**. Históricamente, la progradación de deltas y formaciones arenosas litorales (Campo de Dalías, bahía de Almería) han significado la estabilización de estos sedimentos.
- ⇒ Salidas de sedimentos asociadas a la **dinámica eólica**. La combinación de playas progradantes con un viento dominante del tercer cuadrante ha significado históricamente la detracción de sedimentos del sistema playa para incorporarse a sistemas dunares asociados.
- ⇒ La presencia de **acantilados a plomo** al inicio y final del Tramo y la escasa amplitud de la plataforma continental, a veces con cabeceras de cañones submarinos (Calahonda, Cabo de Gata) próximos al sistema litoral, pueden favorecer la detracción de arenas del sistema litoral y su desplazamiento hacia aguas profundas.

Esta situación en relación al balance sedimentario explica la evolución reciente de todo este Tramo, si bien, especialmente desde la década de 1950, este esquema general ha sufrido profundas modificaciones derivadas de las **intensas alteraciones antrópicas** que han afectado tanto a los *inputs* como a los *outputs* del sistema litoral que controla la evolución de las playas.

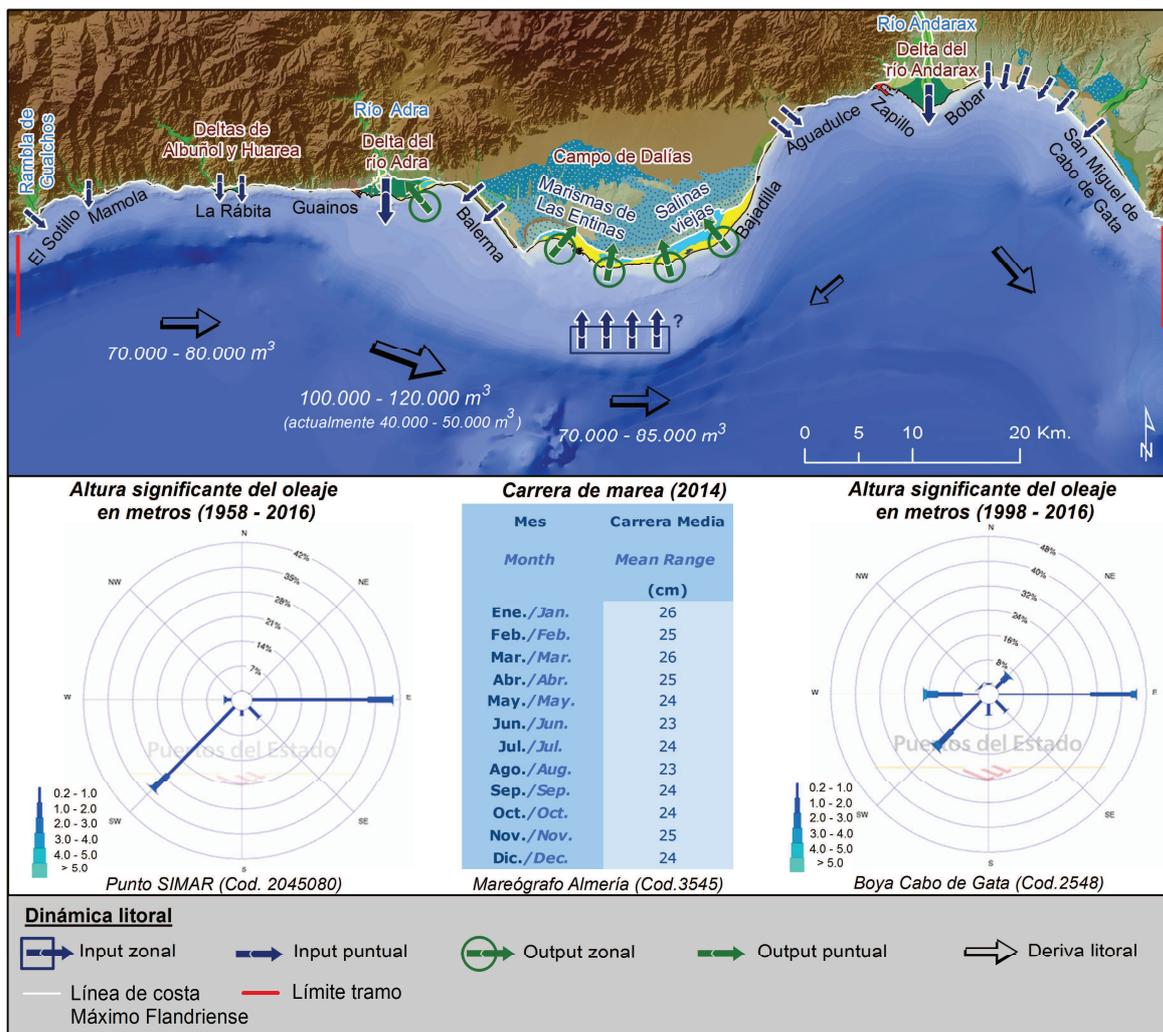


Figura 4.21. Límites, evolución geomorfológica y balance sedimentario en el Tramo 5 (Castell de Ferro-Cabo de Gata).

Fuente: elaboración propia.

4.2.4.2. ALTERACIONES ANTRÓPICAS

Las principales alteraciones antrópicas que suponen una profunda modificación de las características que controlaban la dinámica de las playas de todo este Tramo (ver Figura 4.22), se podrían agrupar en:

- ⇒ Alteraciones que suponen **cambios en los aportes y el balance sedimentario** en las cuencas vertientes (embalses y presas), o la **directa extracción de arenas** para los invernaderos.
- ⇒ Alteraciones de la **dinámica longitudinal** que interrumpen el tránsito parcial o total de los sedimentos (puertos, diques, etc.).
- ⇒ Alteraciones de la **dinámica transversal** del frente costero y que impiden a las playas ajustar su perfil (paseos marítimos, muros de contención, etc.).

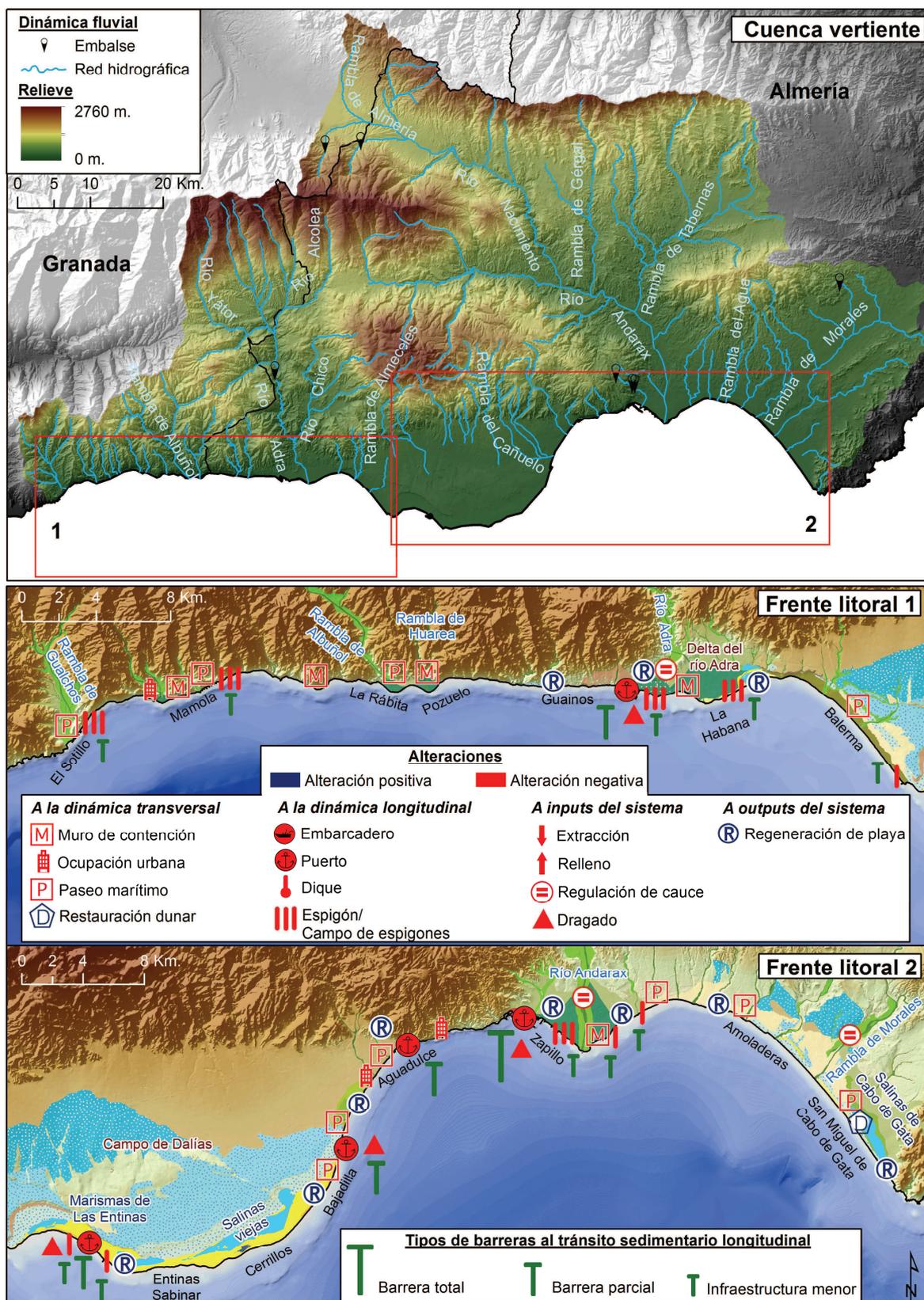


Figura 4.22. Alteraciones de la cuenca vertiente y frente litoral. Fuente: elaboración propia.

ALTERACIONES A LOS APORTES Y AL BALANCE SEDIMENTARIO

Las alteraciones a los aportes y al balance sedimentario constituyen un elemento esencial puesto que, en la mayor parte de la costa andaluza, al igual que en el resto de la costa española, los principales aportes sedimentarios son de origen terrígeno, vinculados a los aportes de granulometría grosera de los cauces fluviales. En este caso es importante destacar los siguientes aspectos:

- ⇒ Las **cuencas vertientes** de los ríos y ramblas que avenan este Tramo, extrañamente para una región como Andalucía, están **escasamente reguladas**. Sólo en los casos de las cuencas de los ríos Adra y Andarax, un sector importante de las mismas está regulado. Es necesario apuntar, sin embargo, que amplios sectores de las vertientes más próximas al cauce han sido muy modificadas por los **aterrazamientos y manipulación de los suelos** para su uso en la agricultura intensiva (invernaderos, cultivos forzados, etc.).
- ⇒ Es significativa la **detracción antrópica de sedimentos de los cauces** (para usos urbanos y agrícolas), e incluso la propia **alteración de sus márgenes** (diques contra los episodios de inundaciones).
- ⇒ La propia **construcción de nuevos cauces** ha significado el desplazamiento de los puntos de aporte (río Adra y rambla de Gualchos) y han supuesto una importante modificación de la dinámica de las playas del entorno o, incluso, como en el caso del río Adra, la generación de un nuevo delta (Jabaloy et al., 2008).
- ⇒ Muy específica de este sector es la **detracción de arenas de playas y dunas** en unos volúmenes muy elevados (Viciano, 2001) desde la década de 1950, asociado al *boom* de la agricultura intensiva e invernaderos que han significado una importantísima alteración del balance sedimentario de algunos sectores (Campo de Dalías, principalmente).
- ⇒ Por el contrario, 2 actuaciones recientes han contribuido positivamente al balance de sedimentos del Tramo, si bien de forma muy puntual:
 - Las recientes **regeneraciones artificiales de playas** afectadas por procesos erosivos (Playa de San Miguel, Zapillo, etc.).
 - Trabajos de **restauración de las dunas** costeras (Playa de Cabo de Gata, etc.).

ALTERACIONES A LA DINÁMICA LONGITUDINAL

La construcción de elementos antrópicos que alteran la dinámica longitudinal resulta de gran trascendencia en este Tramo, dominado también por una deriva litoral neta hacia levante en su mayor parte. En todos los casos va a suponer un doble efecto: un sector acumulativo en la margen occidental de la infraestructura, que retiene una parte de los sedimentos que ésta transporta y un sector regresivo en la margen contraria de la misma, donde la deriva recupera su carga sólida y erosiona el sector inmediatamente posterior a la infraestructura en el sentido de la deriva dominante.

En este Tramo, las siguientes infraestructuras han actuado como **barreras totales** y suponen la división de la unidad fisiográfica original en otras de menor entidad, desconectadas sedimentariamente:

- ⇒ **Puerto de Almería:** Apoyado en los acantilados calizos de las estribaciones más orientales de la Sierra de Gádor, su efecto combinado con los diques transversales de la playa de San Miguel, refuerzan el papel de barrera total de este sector.

Entre las infraestructuras que actúan como **barreras parciales** al tránsito de sedimentos se encuentran:

- ⇒ **Puertos:** El puerto de Adra y los diques exentos de la playa de San Nicolás en esta ciudad constituyen una barrera parcial importante al tránsito de sedimentos transportado por la deriva hacia levante. Su efecto se deja sentir en las playas adosadas al antiguo delta de este río, acusadas por intensos procesos erosivos. Por su parte, el puerto de Almerimar, junto a los efectos de los diques transversales a poniente y levante del mismo, constituyen otra barrera parcial de notoria importancia para las playas aguas debajo de la deriva, antes de llegar a Punta Entinas.
- ⇒ **Diques transversales:** Presentes en las playas de Melicena, La Rábita o Balerma, facilitan la evacuación de cauces y favorecen el acceso a infraestructuras de mayor calado (puertos), evitando el embate directo del oleaje y, con ello, la deposición sedimentaria en zonas no deseadas. También tienen este efecto los diques del encauzamiento del río Andarax y de la nueva desembocadura del río Adra.
- ⇒ **Espigones:** ya sean individuales o en conjunto (campo de espigones), son construidos para favorecer la retención sedimentaria en playas regresivas

(playas de La Mamola y el Zapillo), para proteger el sector oriental del nuevo delta del Adra (playa de La Habana), o retener las arenas en el sector sur de la playa de Balerma, entre otros.

ALTERACIONES A LA DINÁMICA TRANSVERSAL

La ocupación de dunas y playas por la construcción de paseos marítimos y muros de defensa, así como otras infraestructuras que interrumpen el tránsito transversal de sedimentos, tiene un efecto inmediato en las playas, ya que imposibilitan el correcto ajuste de su perfil (ampliándolo y disminuyendo su pendiente en temporales para maximizar la disipación de energía) y, por lo tanto, favorecen los procesos erosivos. Entre las diferentes tipologías de estas alteraciones, en este Tramo pueden encontrarse:

- ⇒ **Ocupación de dunas costeras y playas** por elementos urbanos (Adra, Mamola, Balerma, etc.), especialmente significativos en núcleos turísticos (Almerimar, Roquetas de Mar...).
- ⇒ **Construcción de muros de defensa, escolleras y paseos marítimos** que no sólo impiden la adaptación del perfil a las características puntuales del sino que, además, su presencia genera un efecto de reflexión del oleaje sobre los mismos, amplificando el efecto de las olas que consiguen descalzar la infraestructura mediante el colapso de los mismos. Estas alteraciones no sólo están presentes en casi todos los tramos urbanizados, sino también en amplios sectores asociados a los sectores de los deltas regresivos (Adra, Albuñol, etc.) o formaciones sedimentarias en proximidad de acantilados para proteger los cultivos de la agricultura intensiva que caracterizan a este sector.

4.2.4.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN

Como se ha comentado en el Tramo 1, para la realización de un correcto y eficiente análisis de las tasas de erosión en esta Tesis Doctoral se ha considerado subdividir este Tramo en 5 sectores costeros e incluir, al menos, el tratamiento de cuatro grandes puntos (ver Figura 4.23). En primer lugar, se realizará una descripción completa de las fuentes utilizadas y sus características para cada sector, prestando especial atención a su calidad geométrica y radiométrica, así como a las fechas. En segundo lugar, se presentarán de manera general y a grandes rasgos para el período 1977-2011, los sectores erosivos y regresivos. Seguidamente se comentarán sus principales diferencias con respecto al período 1956-1977 y, por último, sus diferencias con la evolución reciente (período 2001-2011).

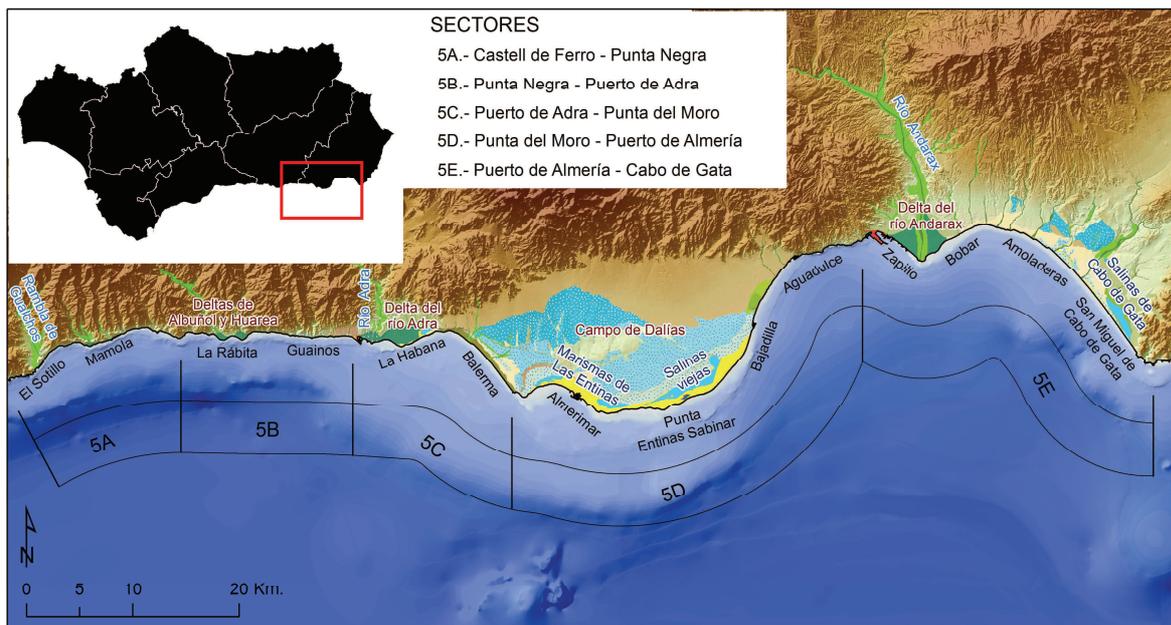


Figura 4.23. Sectores identificados en el Tramo Castell de Ferro-Cabo de Gata para la interpretación de las tasas de erosión.
Fuente: elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES DE DATOS

En este apartado se realizará un análisis pormenorizado de los principales problemas encontrados en las fuentes de información para la interpretación del *proxy* utilizado. A continuación se presentan las fuentes de datos utilizadas en el análisis multitemporal de las tasas de erosión, en función a las características de resolución (espacial, espectral y radiométrica), desfase temporal y disponibilidad de las mismas (ver Tabla 4.3).

⇒ Vuelo Americano 1956-1957: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 1956 tiene las siguientes características:

- Resolución: con un **tamaño de píxel de 1 m.**, constituye en la fuente de datos con menor resolución espacial de las utilizadas para la interpretación de los resultados. Se trata de una ortofotografía procedente de un vuelo **pancromático**, registrando problemas de **saturación en zonas de alta reflectividad**, siempre coincidentes con medio arenosos no consolidados, destacando el extremo meridional de Campo de Dalías (playa de Balerma-playa de los Cerrillos). También se detectan **problemas de nitidez** en a lo largo del golfo de Almería, acentuado en el subtramo Almería-Cabo de Gata.

- **Desfase temporal:** el Tramo 5 fue fotografiado durante la estación invernal, dejando constancia de perfiles disipativos generalizados a lo largo de todo el ámbito. No obstante, se advierten problemas de **desfase temporal de las fotografías**. Así, de esta manera, se observan discontinuidades espaciales de notable repercusión entre las secciones de Castell de Ferro-Punta Negra (volada en marzo de 1957), Punta Negra-playa de Balerma y playa de Los Cerrillos-playa de San Miguel de Cabo de Gata (fotografiadas ambas en febrero de 1957), playa de Balerma-playa de Los Cerrillos (tomada en enero de 1957) y playa de San Miguel de Cabo de Gata-Cabo de Gata (volada en noviembre de 1956).
 - **Disponibilidad:** la ortofotografía presenta **deficiencias de precisión geométrica**. No obstante, no se ha excluido ninguna sección litoral.
- ⇒ Vuelo IRYDA 1977-1983: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 1977 tiene las siguientes características:
- **Resolución:** obtenida a un **tamaño de píxel de 0,5 m.**, constituye una fuente de datos de alta fiabilidad en un período estratégico, a caballo entre la ortofotografía histórica de 1956 y las actuales iniciadas en 1998. La ortofotografía procede de un vuelo **pancromático**, no obstante, los problemas de saturación en zonas de alta reflectividad quedan solucionados. Se observan **zonas de escaso contraste** (playas de Punta Entinas y Amoladeras), donde la ausencia de dunas en zonas puntuales dificulta enormemente la detección del *proxy* elegido.
 - **Desfase temporal:** **no existe desfase temporal**. La ocurrencia de eventos meteorológicos excepcionales previos próximos a la fecha de vuelo (verano de 1977) no quedan reflejados en el perfil dinámico de las playas, mostrando un perfil reflexivo en la mayoría de ellas.
 - **Disponibilidad:** se cuenta con la **total disponibilidad** de ortofotografías para el levantamiento de datos, sin aspectos notables a resaltar.
- ⇒ Vuelo 2001-2002: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 2001 tiene las siguientes características:
- **Resolución:** obtenida a un **tamaño de píxel de 0,5 m.**, supone la primera fuente de datos actual de precisión submétrica. Al igual que las anteriores, procede de un vuelo **pancromático**, sin inconvenientes radiométricos a resaltar.

- Desfase temporal: se detectan **discontinuidades espaciales** como resultado de la diferencia temporal en la toma de fotografías. Las incompatibilidades se observan en las secciones de Castell de Ferro-playa del Ruso (volada en verano de 2003 y en consonancia con el perfil de la siguiente sección, también reflexivo), playa del Ruso-Punta Piedra del Moro, Aguadulce- playa de Costacabana y playa de Retamar-Cabo de Gata (fotografiadas durante el verano de 2001), Punta Piedra del Moro-Aguadulce (volada en invierno de 2001) y playa de Costacabana-playa de Retamar (tomada en invierno de 2003).
- Disponibilidad: se cuenta con la **total disponibilidad** de ortofotografías para el levantamiento de datos, sin aspectos notables a resaltar.

⇒ Vuelo digital 2010-2011: la ortofotografía utilizada para el levantamiento de la línea de costa de 2011 tiene las siguientes características:

- Resolución: se contempla como la fuente de datos más fiable del presente trabajo de investigación desde el punto de vista de la resolución espacial (**0,5 m.**) y espectral (**color + IRC**). No se observan inconvenientes radiométricos a resaltar.
- Desfase temporal: **no existen discontinuidades** en la totalidad del Tramo, fotografiado durante el verano de 2010. En todo el Tramo se observan rompientes del oleaje que hacen intuir la presencia de perfiles reflexivos.
- Disponibilidad: se cuenta con la **total disponibilidad** de ortofotografías para el levantamiento de datos, sin aspectos notables a resaltar.

Ortofotografía	Inconvenientes resolución	Desfase temporal	Disponibilidad
1956 -1957	Espacial: 1 metro	<p><i>Desfase dentro de la misma estación del año:</i></p> <p><i>Castell de Ferro-Punta Negra: marzo 1957</i></p> <p><i>Punta Negra-playa de Balerma y playa de Los Cerrillos-playa de San Miguel de Cabo de Gata: febrero 1957</i></p> <p><i>Playa de Balerma-playa de Los Cerrillos: enero 1957</i></p> <p><i>Playa de San Miguel de Cabo de Gata-Cabo de Gata: noviembre 1956</i></p>	<p><i>Total disponibilidad para el ámbito del Tramo 5</i></p>
	Espectral: <i>pancromático</i>		
	Radiométrica: <i>saturación y falta de nitidez</i>		
1977 -1983	Espacial: 0,5 metros	<p><i>No existe desfase temporal</i></p> <p><i>Verano 1977</i></p>	<p><i>Total disponibilidad para el ámbito del Tramo 5</i></p>
	Espectral: <i>pancromático</i>		
	Radiométrica: <i>escaso contraste</i>		
2001-2002	Espacial: 0,5 metros	<p><i>Castell de Ferro-playa del Ruso: verano 2003</i></p> <p><i>Playa del Ruso-Punta Piedra del Moro, Aguadulce- playa de Costacabana y playa de Retamar-Cabo de Gata: verano 2001</i></p> <p><i>Punta Piedra del Moro-Aguadulce: invierno 2001</i></p> <p><i>Playa de Costacabana-playa de Retamar: invierno 2003</i></p>	<p><i>Total disponibilidad para el ámbito del Tramo 5</i></p>
	Espectral: <i>pancromático</i>		
	Radiométrica: <i>sin aspectos a resaltar</i>		
2010-2011	Espacial: 0,5 metros	<p><i>No existe desfase temporal</i></p> <p><i>Verano 2010</i></p>	<p><i>Total disponibilidad para el ámbito del Tramo 5</i></p>
	Espectral: <i>color + IRC</i>		
	Radiométrica: <i>sin aspectos a resaltar</i>		

Tabla 4.3. Principales características e inconvenientes de las fuentes de datos utilizadas para el Tramo 5.

Fuente: elaboración propia.

TASAS DE EROSIÓN PARA EL PERÍODO DE REFERENCIA 1977-2011

Como puede apreciarse en la Figura 4.24 – Anexo 5A, el patrón de los tramos erosivos y acumulativos es bastante consistente con las características dinámicas del área (presencia de una deriva litoral dominante que moviliza los sedimentos hacia levante) y el efecto de las alteraciones antrópicas introducidas a partir del año 1977.

Sector 5A. Castell de Ferro-Punta Negra

Todo este sector costero está caracterizado por una costa acantilada debido a la proximidad de los relieves de la Sierra de la Contraviesa y un conjunto de ramblas asociadas a cuencas de pequeña entidad, elevada pendiente y forma alargada que le otorgan una gran capacidad erosiva y de arrastre de sedimentos. Por ello, las pequeñas playas existentes están asociadas, o bien a los pequeños deltas que se forman en la desembocadura de las ramblas, o a los depósitos de vertiente que se desarrollan en la base de algunos sectores acantilados. Las **tasas de erosión** en todo el sector son claramente **regresivas**, comportamiento controlado por numerosas obras de ingeniería costera (muros de defensa, escolleras, paseos marítimos...), aplicadas incluso a algunos sectores acantilados para proteger infraestructuras de transporte o proporcionarles estabilidad.

La sección de **Castell de Ferro** está asociada a los depósitos de la desembocadura del río Gualchos (rambla actualmente encauzada). Presenta **tasas de erosión regresivas**, actualmente fijadas en su mayoría por el paseo marítimo existente y obras de infraestructuras.

Otra **sección acantilada separa la anterior del pequeño delta asociado a la rambla del Trigo (Punta de Baños), también afectada por efectos regresivos**. A continuación, un conjunto de poblaciones (La Mamola, Los Yesos, Melicena) se ubican en estrechas llanuras litorales asociadas a los sedimentos aportados por pequeñas ramblas (del Cautor, Yesos y Santa Catalina), y presentan tasas erosivas, controladas por obras ingenieriles.

La aparición de algunas tasas positivas se asocian a los sectores con **obras de ingeniería** (principalmente muros de defensa y escolleras), que **han hecho progradar artificialmente la línea de costa**, en muchos casos sectores acantilados.

Sector 5B. Punta Negra-Puerto de Adra

Este sector mantiene las mismas características generales que el anterior, si bien está caracterizado por los efectos de un **evento excepcional de precipitaciones** que proporciona un comportamiento especial de las tasas de erosión. El evento extremo producido entre el 18 y el 19 de octubre de 1973, con precipitaciones que alcanzaron los 598 mm. en apenas 8 horas (y un caudal de la rambla de Albuñol de 2.580 m³/s), supuso el temporal más virulento de los recordados históricamente en la zona, provocando más de 100 muertos en el núcleo de La Rábita y generando una **progradación súbita de la línea de costa de 180 m. en el delta de Albuñol y de hasta 215 m. en el de Huarea** (Prieto, 2012). Este evento debe ser tenido en cuenta en, al menos, en la interpretación de las tasas de erosión desde Castell de Ferro hasta la playa de Balerna.

La primera sección de este sector, **hasta llegar a los deltas de Albuñol y Huarea, presenta tasas claramente regresivas** asociadas a las pequeñas calas de este segmento acantilado (cala de Chiches).

La siguiente sección asociada a los **deltas del Albuñol y Huarea** es, sin duda, la que presenta los **valores más elevados de tasas de erosión regresivas**, en parte explicadas por la erosión subsiguiente al evento excepcional antes mencionado (consultar tasas en el período 1956-1977). La intensidad del fenómeno regresivo ha supuesto la protección de casi la práctica totalidad de ambos deltas por escolleras, para proteger los cultivos bajo plástico y los núcleos de población (La Rábita y El Pozuelo). Estas infraestructuras han impedido que los retrocesos de la línea de costa sean aún mayores.

La sección costera **desde los deltas de Albuñol y Huarea hasta el puerto de Adra** presenta igualmente un **comportamiento erosivo generalizado**, con los mayores valores asociados a las desembocaduras de ramblas (Alcazaba, Guainos...) y deltas asociados, amenazando gravemente a los pequeños núcleos de población ubicados sobre los mismos (Guainos Bajo, El Lance de la Virgen).

Sector 5C.- Puerto de Adra-Punta del Moro

En este sector se identifican **2 secciones** claramente diferenciadas, siendo la primera asociada al **doble delta del río Adra**. Esta sección tiene como límite el puerto homónimo y una configuración especial: un antiguo delta inactivo en contacto directo con el puerto y el actual delta generado tras la **modificación del cauce original** en 1872

(Jabaloy et al., 2008; 2010). Dicho desvío conllevó el desplazamiento de la desembocadura más de 3 Km. hacia el este de la original, favoreciendo el desarrollo de un nuevo delta y la formación de albuferas en su interior. Constituye un ejemplo muy representativo de la situación de los grandes deltas de la fachada mediterránea de Andalucía (Vélez, Guadalfeo, etc.), todos ellos claramente regresivos. En el caso del delta del Adra, concurren todas las alteraciones antrópicas que favorecen este estado regresivo:

- ⇒ Se trata de una cuenca regulada en un 30 % y muy alterada por la expansión de invernaderos.
- ⇒ El puerto constituye una barrera a la deriva litoral dominante hacia levante favoreciendo la acumulación a poniente del mismo (si los resultados de las tasas en este sector aparecen como regresivas se debe al retranqueo que ha conllevado la construcción de un paseo marítimo) y el déficit sedimentario a levante.
- ⇒ La alteración y desplazamiento del cauce impide la alimentación del antiguo delta.
- ⇒ La extracción de arenas de cauces y playas de delta para construcción de invernaderos.

El resultado es el esperado: **elevadas tasas de erosión para todo este período** que obligaron a llevar un conjunto de actuaciones antrópicas para tratar de estabilizar el retroceso generalizado de la línea de costa: regeneración de playas, diques transversales y exentos, escolleras y muros de contención.

Las primeras intervenciones se produjeron en el **delta antiguo** (ya sin alimentación sedimentaria por el río e impedidos los aportes de la deriva litoral por el puerto), cuya totalidad del frente se encuentra intervenido. El hecho de que las **tasas sean positivas** en el sector oriental son el resultado de la **instalación de escolleras y diques** que ganaron espacio al mar.

El **delta activo actual** presenta, como es lógico, las mayores **tasas de erosión en el flanco occidental y ápice central** (playa Real), dada la interrupción de los aportes procedentes de la antigua desembocadura y la interrupción de la deriva dominante hacia levante. El **sector oriental** (playa de La Habana) también es **claramente regresivo** y ha necesitado su estabilización por **obras de ingeniería** costera (escolleras y espigones).

La segunda sección comienza con las **desembocaduras de nuevas ramblas (Barranco Malo y Balanegra)** y se prolonga hasta la Punta del Moro, en el tramo final de la playa de Balerma. Un primer sector, asociado a las ramblas citadas, describe **comportamientos mayoritariamente erosivos** y un pequeño sector progresivo, correspondiente con el ápice del delta formado por la rambla del Barranco Malo. La ocupación del frente dunar y parte de la playa alta en el núcleo de Balanegra, impide el ajuste del perfil de su playa en situaciones de temporal, generando resultados erosivos en la playa homónima.

Un segundo sector se asocia a la extensa **playa de Balerma hasta Punta del Moro**. Se trata de un sector diferente a los anteriores ya que, al reorientarse la costa hacia el sureste, la playa disminuye notablemente la capacidad de transporte por la deriva litoral hacia levante. Aun así, la construcción de un dique en el extremo sur de la playa parece constatar la persistencia de una pequeña deriva. En general, es un **subtramo relativamente estable** que, en este período presenta **tasas erosivas en el sector más meridional** donde, ni el dique transversal construido ni la regeneración de dunas han conseguido todavía compensar las pérdidas registradas en las primeras décadas del período analizado. El principal problema se centra en la ocupación de la duna costera y la playa alta por las construcciones de la población de Balerma, las cuales, al impedir el ajuste transversal de la playa, genera problemas durante los períodos de oleaje de alta energía.

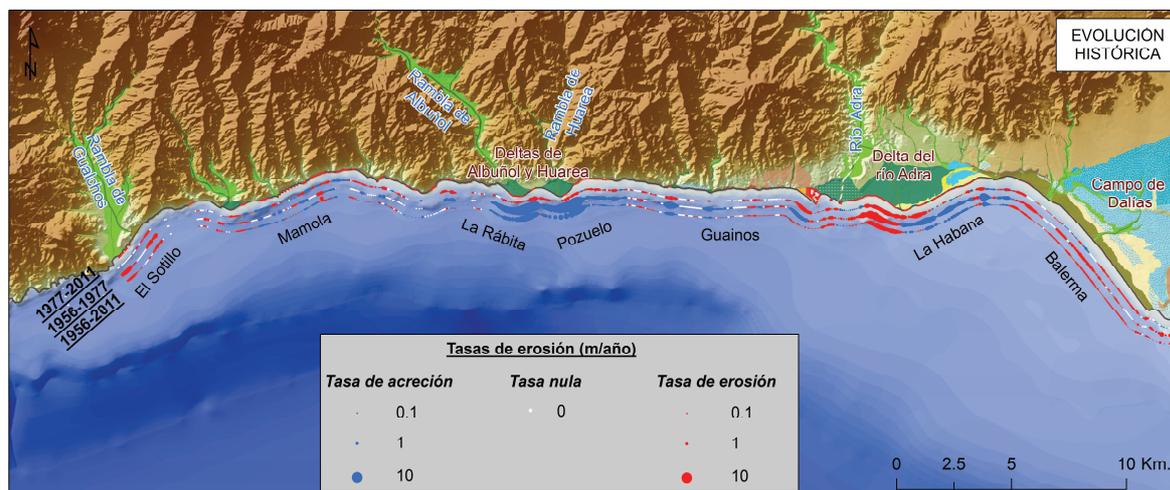


Figura 4.24. Tasas de erosión históricas para los sectores A, B y C del Tramo 5 (ver Anexo 5A). Fuente: elaboración propia.

Sector 5D.- Punta del Moro-puerto de Almería

Todo este sector, hasta el tramo acantilado que precede al puerto de Almería, constituye una unidad especial (Campo de Dalías), donde la presencia de una flexión

este-oeste ha hecho bascular todo el bloque meridional del Campo de Dalías hacia el norte, impidiendo que la red hidrográfica que baja de la Sierra de Gádor alcance el mar (ver Figura 4.25 – Anexo 6A). Este basculamiento hace que no reciba aportes fluviales en toda su longitud, pero a su vez, facilita el afloramiento de la mejor secuencia de terrazas marinas cuaternarias que se elevan hasta los 80-90 m. de altura. Sin embargo, su evolución reciente desde el claro acantilado relicto flandriense (reconocible en todo el sector), ha estado controlada por la acumulación de un conjunto de formaciones arenosas complejas (playas barreras, flechas litorales, etc.), que han dejado aisladas extensas albuferas (en parte explotadas como salinas). Los sedimentos proceden de la destrucción de las terrazas marinas, a lo que se le une, en este caso, una amplia plataforma continental con desarrollo de praderas de fanerógamas. La convexidad hacia el sur hace que la interacción con el oleaje dominante sea compleja y se alternen derivas litorales hacia poniente y levante, predominando el tránsito hacia levante en el sector occidental y hacia poniente en el sector más oriental. Se pueden identificar diferentes secciones.

La primera sección de costa recorre la **Ensenada de San Miguel**, cuya estructura cóncava hacia el norte genera derivas hacia levante, interrumpidas por la construcción del puerto de Almerimar. Todas las playas entorno al puerto, tanto a levante como a poniente, al situarse en el sector oriental de la ensenada, presentan **tasas muy regresivas** por la interrupción del transporte movilizado por las derivas, especialmente intensas en el sector oriental hasta Punta Entinas. El **sector acumulativo** a poniente de la playa de San Miguel tiene su justificación en la **erosión de las playas precedentes** (playas de Los Baños y Faro de Baños).

La sección siguiente (**Punta Entinas-puerto de Roquetas de Mar**) presenta la dinámica más compleja por su forma convexa hacia el sur, la cual genera **ondulaciones de la línea de costa a gran escala por la compleja interacción de las derivas** con la suave pendiente de la plataforma y playa submarina. La abundancia de sedimentos hace que, según los casos, el oleaje se enfoque en algunos sectores u otros. Esta es la razón por la que se observa un primer sector progresivo en la playa de Los Percheles, seguida de un sector claramente erosivo frente a la punta del Sabinar. El recorrido continúa con otro sector progradante en la playa de Los Cerrillos, seguido de otro sector con importantes tasas regresivas hasta las primeras urbanizaciones de Roquetas de Mar. En todo el sector se reconocen los efectos de la detracción de arenas para la construcción, cultivos enarenados e invernaderos (Viciana, 1994; 1999). Finalmente, todo el sector

construido frente a las construcciones de Roquetas de Mar presenta valores regresivos de la línea de costa, hoy fijada por paseos marítimos y muros de defensa hasta el mismo puerto. Los efectos de las construcciones sobre las dunas y playa han llevado a la regeneración de las playas afectadas en varias ocasiones por los daños causados por temporales.

Finalmente, la sección costera entre el puerto de Roquetas de Mar y el puerto de Almería presenta tramos diferenciados. El tramo desde el **puerto de Roquetas de Mar a la playa de Las Salinas** es claramente **regresiva** por el efecto barrera del propio puerto. Desde este punto al **puerto deportivo de Aguadulce** se presenta un sector más **estable**, en parte provocado por la desembocadura de varias ramblas (del Vínculo, Hortichuelas y San Antonio) que finalmente alcanzan el mar en el sector más oriental del Campo de Dalías junto al núcleo de Aguadulce, cuyas urbanizaciones asentadas sobre las playas y dunas generan problemas erosivos. Todo el tramo desde el puerto de Aguadulce al puerto de Almería es un sector acantilado sobre las calizas y mármoles de la Sierra de Gádor.

Sector 5E.- puerto de Almería-Cabo de Gata

Todo este sector está marcado por la desembocadura del río Andarax cuyo delta se sitúa en el centro de la Bahía de Almería. Se podrían identificar diferentes secciones dentro de este tramo.

En primer lugar se encuentra la sección **puerto de Almería-desembocadura del río Andarax**, donde las playas adosadas a poniente del mismo sufrieron un gran impacto por la construcción de un dique transversal de apoyo al desagüe de la Central Térmica (actualmente en proceso de desmantelamiento). Este hecho generó una interrupción de la deriva litoral, con componente dominante a poniente en este sector, provocando la **erosión de las playas de Zapillo y San Miguel**, sometidas a diferentes actuaciones para su estabilización (nuevos diques, diques exentos, regeneración artificial de playas).

La siguiente sección, desde el sector oriental de la desembocadura del río Andarax (**playas de Bobar y de la Cañada**) hasta la **urbanización de Costacabana**, presenta un **comportamiento claramente erosivo**, siendo objeto de intervenciones para su estabilización sedimentaria (escolleras y muros de defensa). En parte se explica por el déficit sedimentario ligado a la escasez de aportes del río Andarax pues, aunque su cuenca está mínimamente regulada, está altamente modificada por la construcción de invernaderos y expansión de la ciudad de Almería en su tramo bajo, junto a importantes

actuaciones en su cauce (diques de encauzamiento, detracción de arenas, etc.). La urbanización de Costacabana sobre las dunas y playa intensifica aún más los efectos del déficit sedimentario, donde la presencia de un dique transversal retiene los escasos sedimentos transportados por la deriva hacia levante.

La sección consecutiva, desde la urbanización de Copacabana hasta la desembocadura de la rambla de Morales, presenta sectores diferentes. Inmediatamente a **levante de Costacabana** se constata la presencia de un sector con **tasas de progradación**, lo cual se explica por la proximidad de la desembocadura de ramblas (de la Sepultura y el Puente de la Quebrada) y por las labores de regeneración dunar realizadas desde 2001. **El resto de este segmento**, presenta una **débil tendencia erosiva** e incluso a la estabilización en algunos sectores, igualmente explicada por la presencia de las desembocaduras de las ramblas de Agua y Amoladeras, así como por la progresiva orientación hacia el sur de la costa, que hace disminuir la deriva al situarse casi ortogonal al oleaje dominante de levante.

Por último, **la sección final correspondiente a la rambla Morales-Cabo de Gata**, está caracterizada por la presencia de playas rectilíneas adosadas a antiguos cordones de arenas y gravas (playas y terrazas marinas tirrenienses) que actualmente aíslan de forma conjunta la albufera de Gata y las explotaciones de salinas asociadas (Viciana, 2001). Todo el subtramo tiene una orientación casi ortogonal al oleaje dominante de levante por lo que evolución durante el período ha sido bastante **estable** (isobatas paralelas a la línea de playa), sobre todo después de las labores de restauración de dunas llevado a cabo durante los últimos años. Sin embargo, algunos sectores puntuales presentan tasas erosivas, sobre todo el tramo final en la playa de la Fabriquilla.

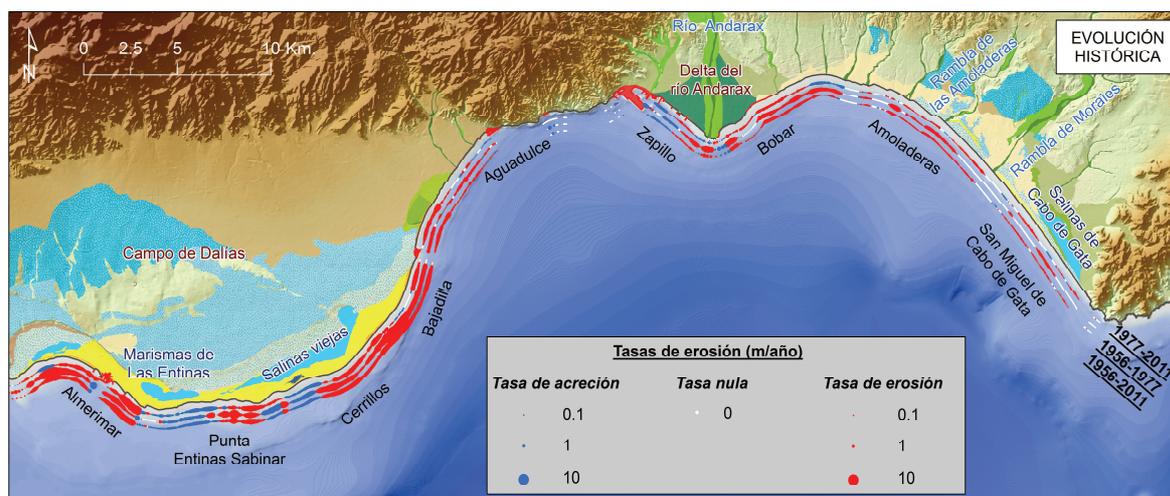


Figura 4.25. Tasas de erosión históricas para los sectores D y E del Tramo 5 (ver Anexo 6A). Fuente: elaboración propia.

DIFERENCIAS ENTRE LAS TASAS DE EROSIÓN ENTRE EL PERÍODO 1956-1977 Y EL DE REFERENCIA 1977- 2011

Las deficiencias en la geometría (dificultades para la generación de la ortofotografía) y la escasa calidad radiométrica y espacial de la Ortofotografía de 1956 han motivado, al igual que en el Tramo anterior, que sólo sean marcadas las principales diferencias entre ambos períodos, es decir, aquellas que puedan constatarse inequívocamente. Como puede apreciarse (ver Figuras 4.24 y 4.25 –Anexos 5A y 6A-), el Tramo presenta sensibles diferencias respecto al período de referencia (1977-2011), principalmente vinculadas a que en este intervalo, la mayor parte de **las principales alteraciones antrópicas al tránsito longitudinal y transversal no estaban construidas**.

En primer lugar, la simple inspección visual de este Tramo en 1956 revela la abundancia de sedimentos en la costa y en los cauces y desembocaduras de las ramblas, lo cual es de cierta lógica por varios motivos:

- ⇒ La mayor parte de las cuencas de los ríos y ramblas, principal fuente puntual de sedimentos, se encontraban exentas de regulación hidrológica y sus cauces característicos (ramblas) presentan una gran actividad al no haber sufrido ningún tipo de modificación antrópica (encauzamientos, detracción de áridos, etc.).
- ⇒ Está constatado por diferentes estudios que, en este período, se produce una disminución de la protección del suelo por la vegetación y el consiguiente incremento de la erosión en las cuencas debido al aumento de la demanda de tierra para cultivo e intensificación de la ganadería (CMA, 2009). En este período, además, el proceso de la transformación a la agricultura intensiva (enarenados, acolchados, invernaderos) era incipiente.
- ⇒ No había prácticamente interferencia a la dinámica litoral (sólo los puertos de Adra y Almería) y, por lo tanto, los sedimentos aportados movilizados por la deriva podrían completar su recorrido.

Las principales diferencias se observan en los siguientes sectores:

Sectores 5A y 5B. Castell de Ferro- Punta Negra y Punta Negra-Puerto de Adra

Estos sectores se han unido para este intervalo, ya que ante la ausencia de alteraciones antrópicas a la dinámica en las playas, su comportamiento es muy similar.

Igualmente es interesante su tratamiento conjunto, ya que estos sectores fueron los más impactados por el evento de lluvias excepcional, ya comentado anteriormente. Como se expuso, el evento extremo de 1973 supuso un avance de la línea de costa del orden de 180 m. en el delta del río Albuñol y hasta de 215 m. en el del Huarea. Para la interpretación de las tasas es obligatorio, por lo tanto, reflejar que la Ortofotografía de 1977 recoge fielmente estos espectaculares avances de los deltas en todo el sector, ya que la dinámica marina sólo habría podido iniciar los procesos de remoción y distribución por la costa de estos abundantes sedimentos.

El sector de las playas de **Castell de Ferro a Punta de Baños** presenta, en cambio, **tasas erosivas** por su mayor distancia al foco del evento extremo y por la transformación (presencia de 2 desembocaduras) del tramo final de la rambla de Gualchos, mostrando signos erosivos en la Ortofotografía de 1977. En la Punta de Baños se observan tasas progradantes en el ápice del delta y erosión en los flancos del mismo.

En el sector **Punta de Baños-puerto de Adra** se constatan los efectos del evento extremo de precipitaciones y, prácticamente todos los deltas y desembocaduras de las ramblas del sector (del Candor, Santa Catalina, Albuñol, Huarea, Alcazaba, Guainos, etc.), presentan unas **tasas positivas** haciendo progradar la costa. El caso más extremo se experimenta, lógicamente, en los deltas de los ríos Albuñol y Huarea donde la progradación fue de tal magnitud que, ni siquiera comparando con la línea de costa actual del delta, se ha recuperado la posición original de 1956, proporcionando tasas positivas para el período global 1956-2011. Este fenómeno resulta extraño en el contexto de los deltas de la costa mediterránea de Andalucía y se explica por las obras de ingeniería realizadas para fijar la costa y defender las actuales explotaciones agrícolas ligadas a invernaderos (diques y escolleras). Prueba de ello son las tasas negativas que presenta este sector en el período de referencia (1977-2011) sin llegar a la posición de 1956 al impedirlo las obras de defensa costera.

Sector 5C.- Puerto de Adra-Punta del Moro

En este subtramo se puede constatar la enorme transformación que tuvo la creación del nuevo delta del río Adra y el abandono del antiguo, así como los procesos erosivos en el resto del área (playa de Balerna).

En las playas del doble delta del río Adra se pueden observar notables diferencias respecto al período de referencia. El **delta antiguo**, ante la escasez de suministro sedimentario aportado por el río Adra tras su desvío a la nueva desembocadura, junto al

efecto de barrera a los sedimentos producido por el puerto, **presenta en todo su frente tasas negativas**. Más importantes aún son los efectos de las dos causas anteriores sobre el delta actual:

- ⇒ en todo el **flanco occidental** (claramente deficitario por las causas antes citadas) se producen **tasas de regresión mucho más altas** y
- ⇒ por el contrario, la suma de los sedimentos erosionados en el flanco occidental, más los nuevos aportes llevados por el río Adra a su nueva desembocadura, generan **importantes tasas de progradación en todo el sector oriental del delta**.

De hecho, las todavía incipientes playas-barrera que ya habían comenzado a aislar las dos albuferas (Honda y Nueva) se consolidan totalmente, incrementando el aislamiento de las albuferas de la influencia marina.

Por su parte, la sección desde las **desembocaduras de nuevas ramblas (Barranco Malo y Balanegra)** hasta la Punta del Moro en el tramo final de la playa de Balerma, presenta igualmente **tasas regresivas**, en este caso justificadas por la abundancia de sedimentos que aportaban las ramblas que desembocan en este sector en 1956, donde la deriva litoral hacia levante se debilita mucho por el giro de la costa hacia el sur.

Sector 5D.- Punta del Moro-puerto de Almería

En las playas de la **ensenada de San Miguel**, primera sección de este sector, se distingue un **comportamiento claramente regresivo**, coincidente con los efectos de la interrupción al tránsito sedimentario a raíz de la construcción del puerto de Almerimar (inexistente en la Ortofotografía de 1956).

Por su parte, desde **Punta Entinas hasta el puerto de Roquetas de Mar** se presenta un comportamiento característico de **zonas alternantes de erosión y acumulación** debido a la especial dinámica de este sector (comentada en el período anterior), caracterizada por la ausencia de aportes fluviales (elevación tectónica) y exposición a levantes y ponientes cuyo resultado es una costa con “ondulaciones” a gran escala que migran lateralmente, desplazándose relativamente los sectores regresivos y progresivos. De cualquier forma, las tasas regresivas son las predominantes, especialmente en el sector oriental, más expuesto a la deriva de levante y donde todavía son incipientes las urbanizaciones de Roquetas de Mar e, inexistentes, las de Aguadulce.

Sector 5E.- Puerto de Almería-Cabo de Gata

Este sector presenta, en prácticamente toda su longitud **hasta la rambla de Las Amoladeras**, un **comportamiento regresivo**, aun partiendo de una situación en 1956 caracterizada por la ausencia de intervenciones antrópicas en las cuencas del Andarax y resto de ramblas (de La Sepultura, El Puente de la Quebrada, El Agua, Las Amoladeras, Morales), que avenan al sector (aterrazamientos, cultivos intensivos, regulaciones de cauces...). La única presencia de tasas positivas, junto al puerto (playas de San Miguel y Zapillo), se deben a las intervenciones antrópicas para corregir los efectos del puerto y del dique de la Central Térmica (ya construido en 1956).

El **resto de este sector presenta claramente tasas regresivas** por la importante reducción de sedimentos aportados por el Andarax, cuya cuenca va progresivamente viéndose afectada a lo largo del período (detracción de arenas y diques de encauzamiento en los cauces, progresiva proliferación de los cultivos intensivos, etc.). Estas tasas regresivas son muy importantes en el ápice del delta y todas las playas inmediatamente posteriores al mismo (Bobar, Copacabana, etc.) hasta la actual urbanización de Retamar, beneficiadas de la deriva dominante hacia levante.

El segmento desde la **playa de la Amoladeras hasta Cabo de Gata** (donde la deriva prácticamente es inexistente por su orientación), por el contrario, describe un **comportamiento mayoritariamente estable**. Sólo en la desembocadura de esta rambla y frente a la playa de La Almadraba se detectan pequeños sectores regresivos de escasa consideración.

DIFERENCIAS ENTRE LAS TASAS DE EROSIÓN DE LOS PERÍODOS 2001-2011 Y 1977-2011

La elección de este último intervalo (2001-2011), el más reciente para la evolución de este Tramo e incluido en el período de referencia (1977-2011), es revelador de los efectos de continua ocupación antrópica de litoral, así como de la influencia que actualmente tienen las **importantes labores de ingeniería de defensa de costas** en todo el Tramo (ver Figura 4.26 – Anexo 5B).

Estos hechos (escolleras, muros de defensa longitudinales, diques exentos, etc.) hacen que, teniendo en cuenta el *proxy* utilizado (límite superior playa en contacto con dunas o infraestructuras), la mayor parte del Tramo tenga un **comportamiento estable**

en la tasas (imposibilidad de migrar la línea de costa hacia el interior). En este sentido, las diferencias más importantes con el Tramo de referencia se comentan a continuación:

Sectores 5A y 5B. Castell de Ferro-Punta Negra y Punta Negra-puerto de Adra

Este sector se encontraba ya dotado en 2001 de la mayor parte de las infraestructuras de defensa en los principales núcleos (Castell de Ferro, Mamola, Melicena...) y en la mayor parte de los segmentos erosivos. Por lo tanto todo el sector presenta tasas tendentes a la **estabilidad “forzada” por el efecto de infraestructuras**, salvo algunos sectores erosivos coincidentes con pequeños deltas o por el retranqueo del frente de la infraestructura.

Sector 5C.- Puerto de Adra-Punta del Moro

En este sector el comportamiento es parecido al anterior. Presenta tasas tendentes a la **estabilidad “forzada” por el efecto de las infraestructuras de defensa del delta del río Adra**, salvo algunos sectores erosivos ligados al retranqueo del frente de la infraestructura (dique occidental del puerto y ápice del antiguo delta), entornos del tramo cercano a la desembocadura de la rambla del Barranco y extremo meridional de la playa de Balerna. El **único segmento que presenta tasas positivas** es, respondiendo a la lógica, el segmento ligado directamente a la bocana de la **desembocadura del delta actual**.

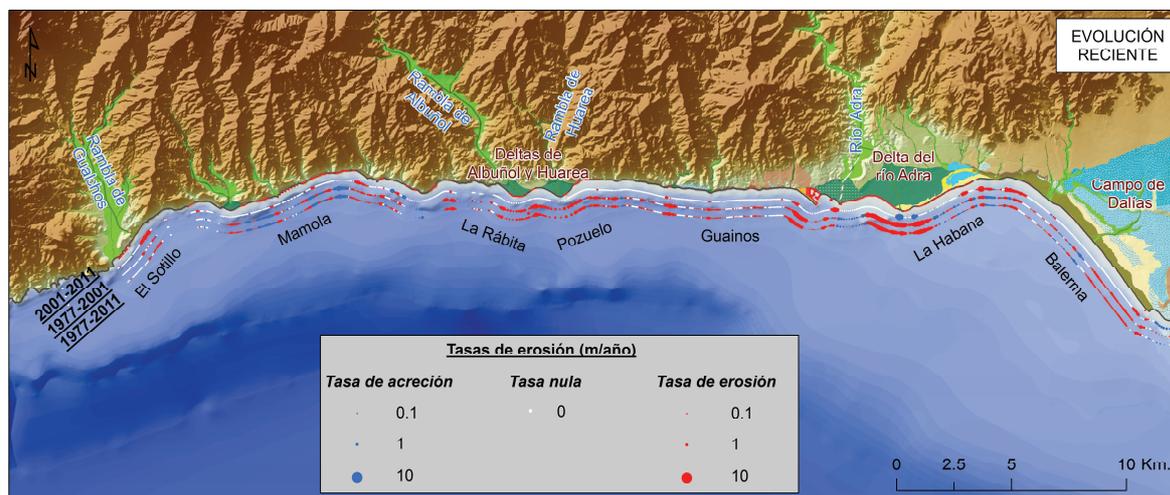


Figura 4.26. Tasas de erosión recientes para los sectores A, B y C del Tramo 5 (ver Anexo 5B).
Fuente: elaboración propia.

Sector 5D.- Punta del Moro-puerto de Almería

En las playas de la **ensenada de San Miguel**, primer segmento de este sector, se distingue un comportamiento diferenciado a poniente o a levante del puerto de Almerimar. **A poniente destaca un comportamiento estable** con algunos puntos regresivos (frente a Punta de Baños) e, incluso, un sector con tasas progresivas (sector oriental de la playa de Baños) a continuación del tramo erosivo anterior, ligadas a las actuaciones de regeneración del sistema dunar llevadas a cabo en este período. Por el contrario, **a levante** del puerto, tras un **sector artificialmente estabilizado**, se observan elevadas tasas de erosión en el tramo de playa anterior a Punta Entinas.

Desde **Punta Entinas al puerto de Roquetas de Mar** se sigue presentando el comportamiento característico de **zonas alternantes de erosión y acumulación debido a la especial dinámica de este sector** (ya comentada en los períodos anteriores), si bien mayoritariamente presenta situaciones estables. Los sectores progresivos se asocian al borde meridional del Campo de Dalías, mientras que el sector oriental presenta sectores regresivos puntuales, casi siempre vinculados al retranqueo de infraestructuras (paseos marítimos, principalmente) ligado a las urbanizaciones de Roquetas de Mar y Aguadulce (ver Figura 4.27 – Anexo 6B).

Sector 5E.- Puerto de Almería-Cabo de Gata

Este sector presenta, en prácticamente toda su longitud, un **comportamiento estable** por diversas razones. En primer lugar, ambos flancos del delta del Andarax se encuentran totalmente ocupados por infraestructuras que “fuerzan” esta estabilidad del frente al impedir el retroceso de la línea de costa. Sólo en dos sectores se presentan puntualmente tasas positivas, bien ligadas a la llegada de nuevos aportes (un pequeño sector de la desembocadura del río Andarax y de la rambla de la Sepultura), bien a un sector que se ha beneficiado de las labores de restauración de playas y dunas (playas inmediatamente a levante de la urbanización de Costacabana).

En el segmento desde la **playa de las Amoladeras hasta Cabo de Gata** (donde la deriva litoral prácticamente es escasa o inexistente por su orientación), su comportamiento continua siendo mayoritariamente **estable**.

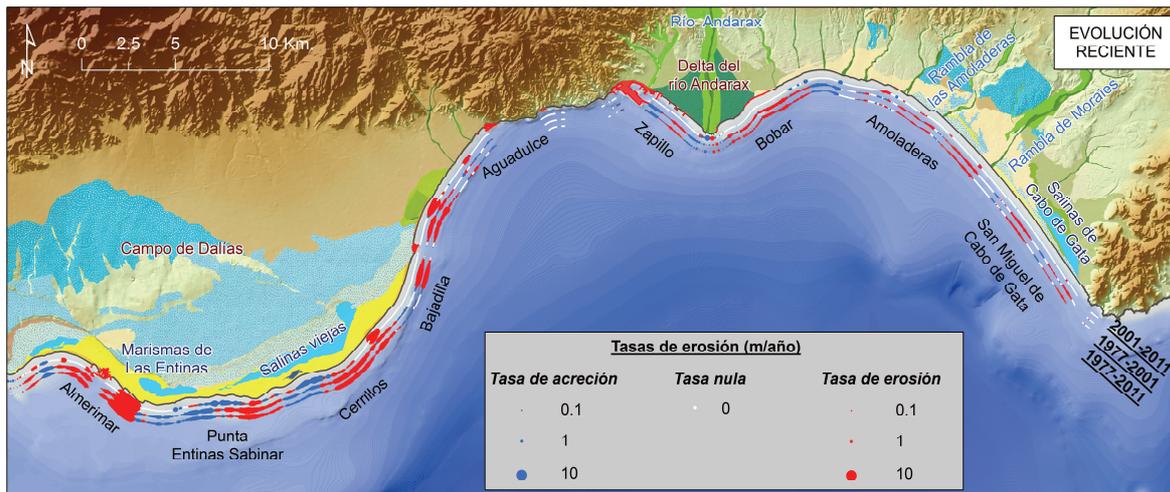


Figura 4.27. Tasas de erosión recientes para los sectores D y E del Tramo 5 (ver Anexo 6B).
Fuente: elaboración propia.

4.3.- RESULTADOS DE LA EXPLOTACIÓN DE INDICADORES TEMÁTICOS

Los indicadores temáticos, desarrollados metodológicamente en el Capítulo 3 de la presente Tesis, suponen un claro exponente de la utilidad de un modelo de datos que integra información geométrica y alfanumérica de carácter temático. Dado el enorme abanico de indicadores posibles, a continuación se exponen aquellos que se consideran de mayor utilidad práctica en función de la temática y objetivos del presente trabajo de investigación.

4.3.1.- INDICADORES DE CÁLCULO GEOMÉTRICO

El primero de ellos, siguiendo el orden del anterior capítulo, es la **playa útil** (ver Figura 4.28). Calculada como variable que refleja la disponibilidad de sedimentos ante los temporales, así como de la capacidad de carga turística de una determinada zona litoral, ha sido presentada en varios congresos y artículos de ámbito nacional e internacional desde su desarrollo para el Subsistema Litoral y Medio Marino –SSLMM- (Díaz et al., 2012; 2013; 2014; Ojeda et al., 2013; Fernández et al., 2015). El cálculo superficial, expresado mediante una capa poligonal continua, contiene el área precisa de cada playa, en función de la toponimia oficial del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) y límites administrativos municipales procedentes del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (IECA). Por su parte, el cálculo de anchura lineal, expresado mediante una capa puntual (coincidente con la intersección entre línea de costa y transectos), describe la anchura precisa de la playa útil, mostrando las variaciones espaciales que tienen lugar en el frente costero, discretizadas cada 50 m.

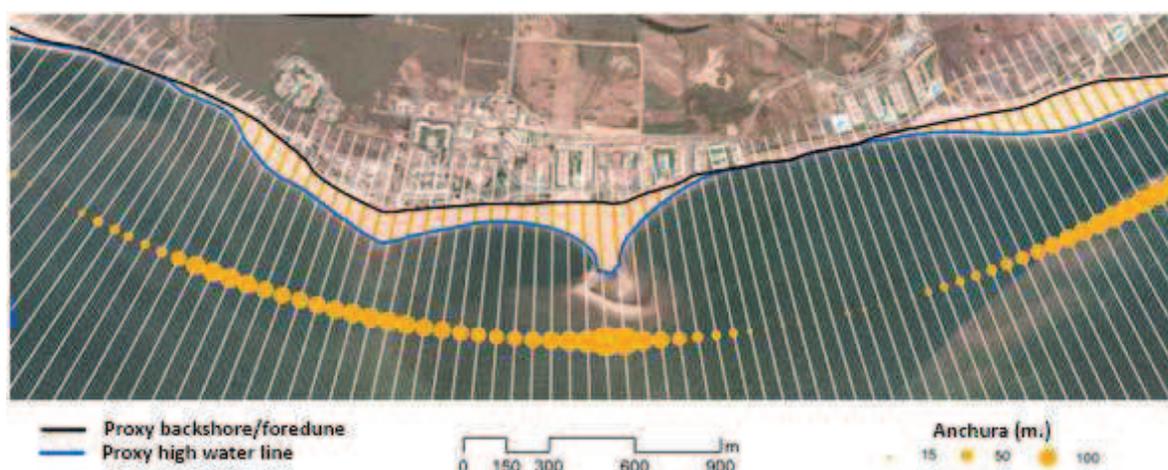


Figura 4.28. Cálculo de la playa útil poligonal (área entre *proxies*) y de distancias lineales (anchura).

Fuente: elaboración propia.

4.3.2.- INDICADORES DE INTERÉS PARA LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA

Los conceptos de **líneas de costa corta y larga** responden a las diversas necesidades surgidas a la hora de caracterizar de forma estadística y gestionar el espacio costero, siendo presentados, al igual que el indicador “playa útil”, en diversos congresos y artículos nacionales e internacionales (Díaz et al., 2012; 2013; 2014; Ojeda et al., 2013; Fernández et al., 2015). La línea de costa larga, tal y como se comentó en el Capítulo 3, describe de forma pormenorizada todo el espacio influenciado por el oleaje y la marea, incluyendo la red total de caños mareales y estuarios, así como las infraestructuras costeras presentes, alcanzando longitudes totales considerables (ver Figura 4.29). La línea de costa corta, por su parte, recoge lo que comúnmente se entiende por frente costero expuesto, evitando el recorrido por ambientes protegidos del oleaje y por el contorno de las infraestructuras, siendo utilizado para la construcción de indicadores y estadísticos oficiales (Ojeda et al., 2013).

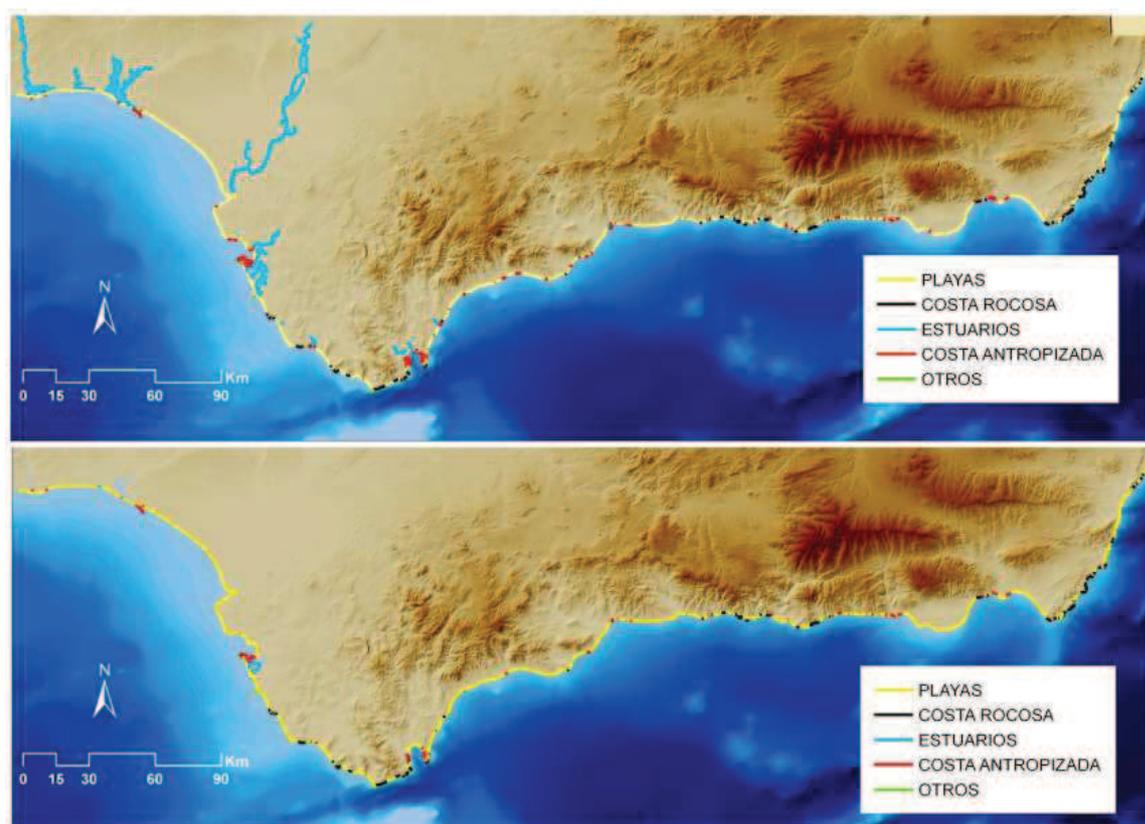


Figura 4.29. Conceptos de líneas de costa. Imagen superior: línea de costa larga. Imagen inferior: línea de costa corta.

Fuente: extraído de Ojeda et al. (2013).

La distancia de línea de costa se ve alterada según el concepto de línea de costa utilizado (ver Tabla 4.4). Es el caso del frente costero expuesto, reducido en 1.500 Km.

Tipología	Línea larga (Km.)	Línea corta (Km.)	Porcentaje larga	Porcentaje corta
Playas expuestas	625,63	620,22	27,14	69,01
Costa rocosa	151,57	151,57	6,42	16,47
Estuarios y caños de marisma	1.232,99	25,57	51,41	2,79
Costa expuesta antropizada	365,08	111,69	14,69	10,85
Otros	7,75	7,81	0,34	0,88
TOTAL (Km.)	2.382,99	916,97	100	100

Tabla 4.4. Distancias y porcentajes globales de líneas de costa larga y corta por tipología.
Fuente: modificado de Ojeda et al. (2013).

Para la generación de indicadores municipales se suele utilizar la línea de costa corta (frente costero expuesto) para su expresión como porcentaje. A continuación se recogen algunos ejemplos:

- ⇒ **Tipología del frente costero:** para la identificación del frente costero expuesto a nivel municipal son interesantes los indicadores relacionados con la tipología del frente costero. Se trata de un indicador porcentual de gran utilidad para conocer, a *grosso modo*, la predominancia de playas, acantilados e infraestructuras a escala municipal (ver Figura 4.30).

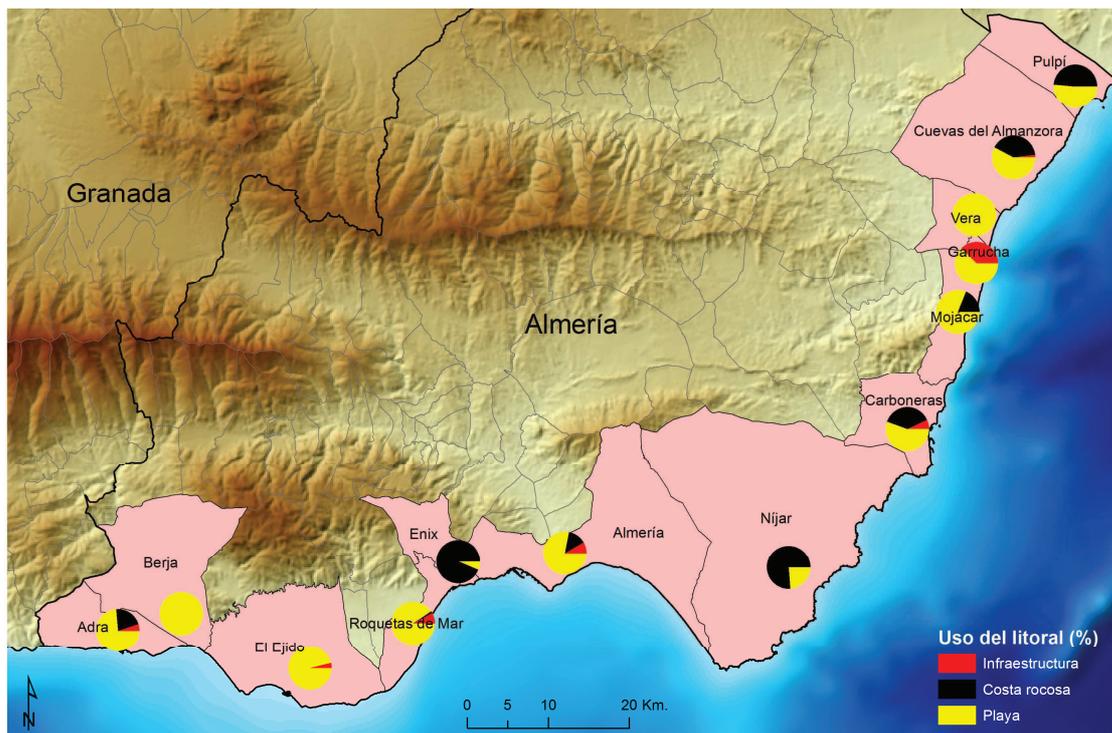


Figura 4.30. Porcentaje de tipología del frente costero por municipio en la provincia de Almería. Fuente: elaboración propia.

⇒ **Alteración antrópica de playas:** las playas, muy dinámicas dado el carácter disgregado de sus materiales, son susceptibles a cualquier cambio que suponga la alteración de su perfil de equilibrio (ver Capítulo 2). En este caso, los indicadores que reflejan el **porcentaje de frente costero alterado por infraestructuras** ayudan a comprender la distribución espacial de las playas más alteradas por infraestructuras situadas en primera línea, como paseos marítimos, muros de contención o construcciones urbanas. Los patrones de distribución ayudan a explicar las características de la playa útil (perfil, anchura...) así como de la evolución de su dinámica litoral (ver Figura 4.31).

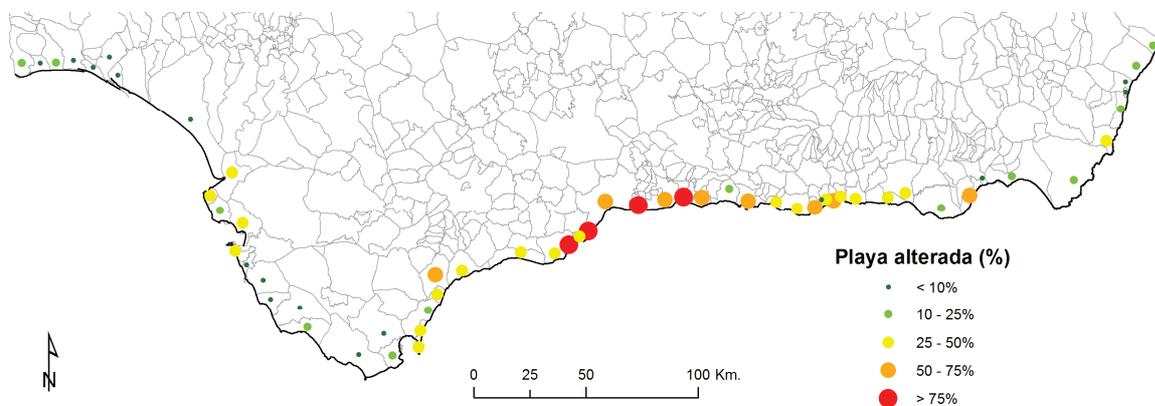


Figura 4.31. Porcentaje de playas con alteraciones antrópicas por infraestructuras por municipio. Fuente: elaboración propia.

⇒ **Longitud de playas:** como indicador complementario al anterior, éste muestra, mediante el uso de símbolos tridimensionales (esferas), la longitud total de playa por municipio. De forma paralela se muestran los datos porcentuales de la longitud de playa por municipio (ver Figura 4.32).

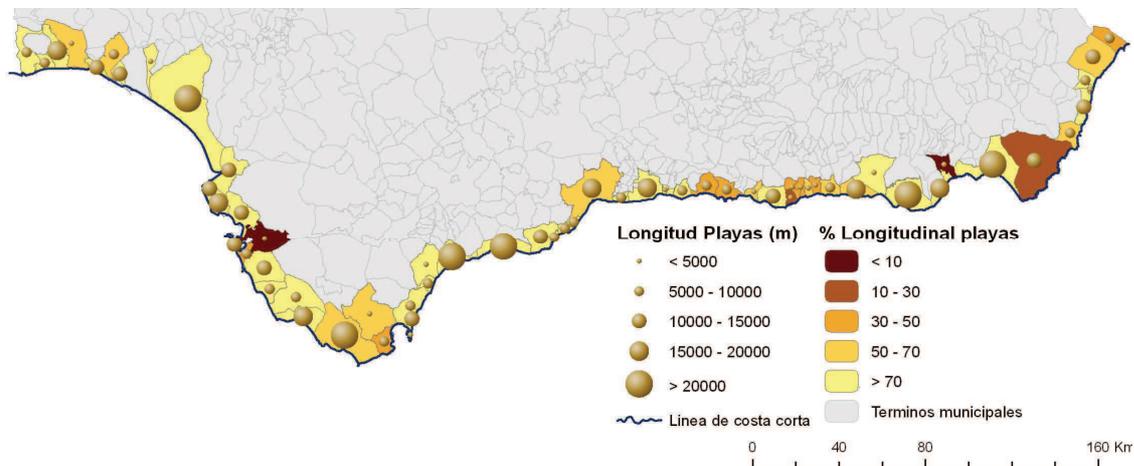


Figura 4.32. Longitud de playa (lineal y porcentual) por municipio.
Fuente: elaboración propia.

⇒ **Indicador de interés ambiental:** los indicadores temáticos de interés ambiental, como por ejemplo la **longitud de frente costero protegido** (ver figura 4.33) o la **presencia de dunas litorales**, ayudan a entender la distribución en la costa de las principales zonas naturales y su estrecha relación con las zonas alteradas, así como, en el caso de la presencia de dunas, sus efectos en la evolución de la dinámica costera a escala regional.

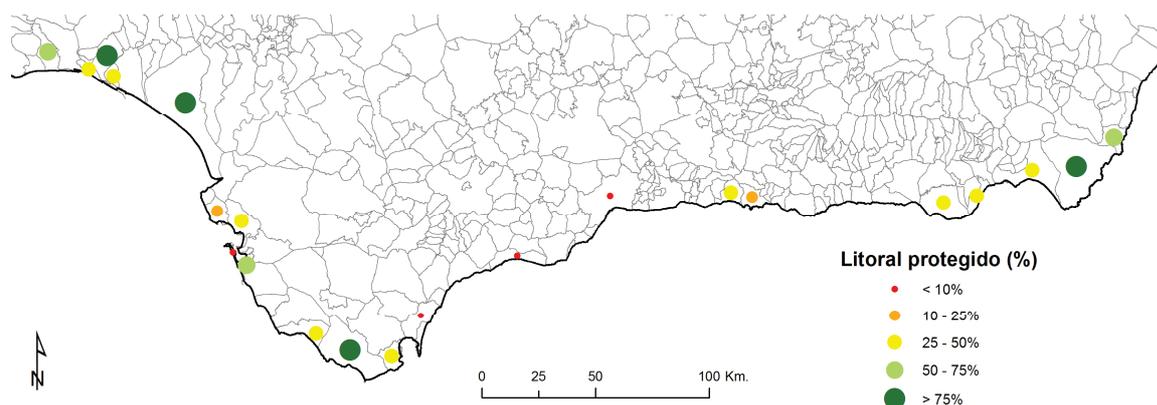


Figura 4.33. Porcentaje de frente costero protegido por municipio.
Fuente: elaboración propia.

4.3.3.- ÍNDICES SINTÉTICOS COMPLEJOS

La gran cantidad de información recogida en la base de datos espacial resultante de esta Tesis doctoral permite, igualmente, la elaboración de indicadores sintéticos de gran interés para la administración. En este apartado se muestra los resultados de un indicador de gran interés para la costa andaluza: **sensibilidad a la pérdida de playas como recurso turístico por los procesos erosivos**.

Tal y como ya se comentó en el apartado 3.4.2.3, la construcción del índice expresivo de la sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico, propuesto y desarrollado inicialmente por Ojeda et al. (2013), se ha realizado a partir del cálculo e integración de cuatro variables: anchura de la playa útil, presencia de dunas costeras, tasas de erosión históricas negativas y tasas de erosión históricas positivas.

- ⇒ La **anchura de la playa útil**, entendida como capacidad física (relacionada con la superficie disponible como recurso turístico), constituye uno de los resultados más importantes de este trabajo, donde se han obtenido anchuras de playa para todas las fechas de análisis. Tal y como ya se comentó en el Capítulo 2, el carácter dinámico de la playa, influenciado principalmente por la acción del oleaje y otros agentes, impide una demarcación estable de los límites de la misma. Así, para el cálculo de la playa seca y su importancia desde el punto de vista turístico se ha obtenido a partir del valor medio de las playas para los años 2009 y 2011. La elección de ambas fechas se justifica por ser las más recientes, además de mostrar un claro perfil reflexivo de sus playas al ser voladas durante el estío.
- ⇒ La **presencia de dunas costeras**: En este caso, la presencia de dunas costeras garantiza la persistencia de la playa aún cuando se vea sometida a intensos procesos erosivos que pueden conllevar al consiguiente retranqueo de su posición original. En este sentido, a mayor extensión de dunas, menor sensibilidad de la playa a su pérdida como recurso turístico.
- ⇒ Las **tasas de erosión históricas**, calculadas para toda Andalucía a escala de detalle para varias fechas, se ha utilizado la tasa 1956-2011 para el cálculo de este indicador. A mayor tasa de erosión, mayor sensibilidad de la playa a su pérdida como recurso turístico.
- ⇒ Las **tasas de acumulación históricas**, calculadas para toda Andalucía a escala de detalle para varias fechas, se ha utilizado la tasa 1956-2011 para el

cálculo de este indicador. A mayor tasa de acumulación, menor sensibilidad de la playa a su pérdida como recurso turístico.

Estas 4 variables están asociadas a los puntos equidistantes tras la intersección de los transectos con la línea de costa de 2011.

La Figura 4.34a representa el 20% de los valores más bajos alcanzados por el indicador, es decir, las zonas del litoral andaluz con mayor sensibilidad a la pérdida de las playas. Principalmente, la mayor parte de ellas se localizan en el litoral mediterráneo, donde los escasos aportes sedimentarios contrastan con una elevada presión antrópica. Esta intensificación antrópica (urbana y de infraestructuras costeras) ha provocado por un lado, un gran impacto sobre las dunas costeras, las cuales han desaparecido o han sido reducidas en gran medida, y por otro, una modificación en el balance sedimentario costero, induciendo un incremento generalizado en las tasas de erosión.

Por el contrario, la Figura 4.34b muestra las zonas del litoral andaluz con menor sensibilidad a la pérdida de playas (20% de los valores más altos alcanzados por el índice), correspondientes a playas de gran extensión, con presencia de dunas y un balance sedimentario positivo. Éstas se encuentran mayormente en el litoral atlántico, donde una intensa deriva litoral y un mayor aporte sedimentario, unidos a la aplicación de diferentes figuras de protección a determinados espacios costeros (Parque Nacional de Doñana, Parque Natural de Doñana, Paraje Natural Marismas del Odiel, Monumento Natural del Asperillo...), han favorecido un mayor grado de naturalidad, una menor presión antrópica y la preservación de la duna costera en muchos sectores. Este hecho se registra también en algunos enclaves del litoral mediterráneos, influenciados por alguna figura de protección (Parque Natural Cabo de Gata-Níjar, Paraje Natural Punta Entinas-Sabinar o Monumento Natural Dunas de Artola o Cabopino).

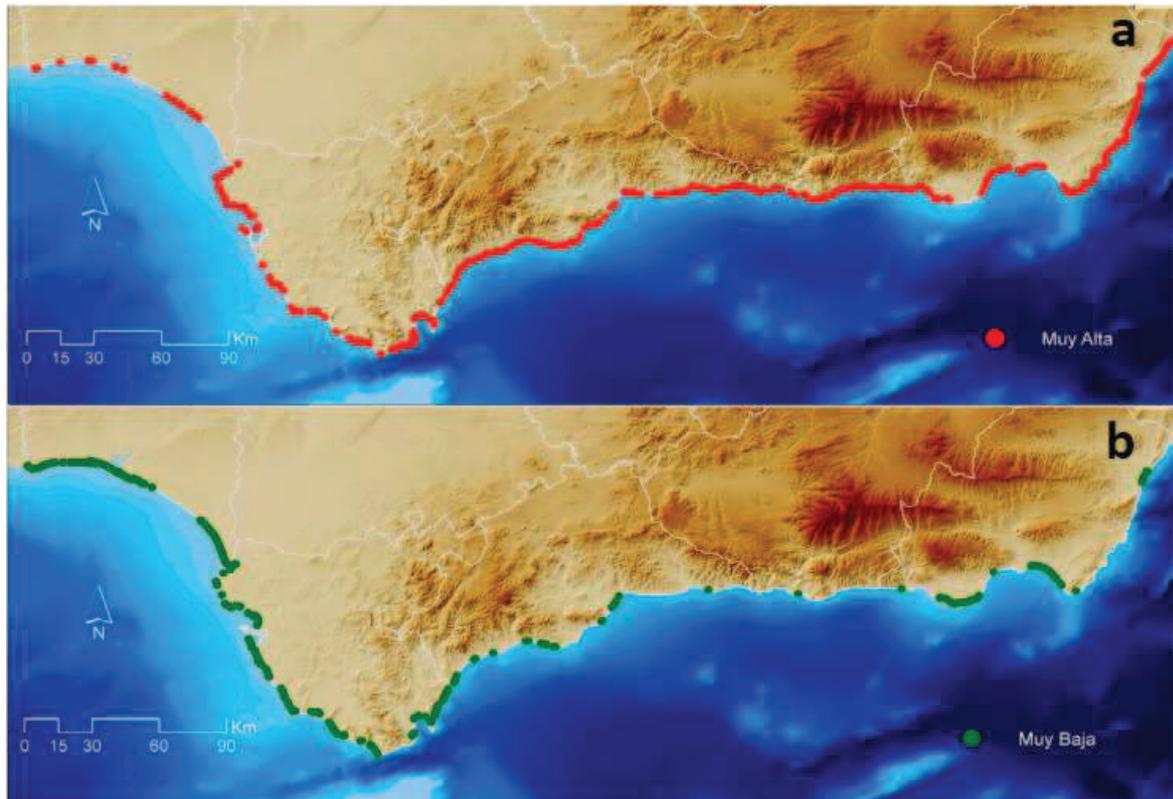


Figura 4.34. Representación de los mayores y menores valores de sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico.

Fuente: extraído de Ojeda et al. (2013).

Además de su representación en distintos puntos paralelos a la línea de costa, para la representación cartográfica del índice, (véase Figura 4.35), se ha utilizado el método de representación utilizado por el *USGS* para el Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI), que ha sido previamente utilizado por los autores en trabajos anteriores (Ojeda et al., 2009). Así, todas las variables y el cálculo total de sensibilidad adoptan una representación de rectángulos paralelos a la costa, que pueden ser de diferente tamaño según la escala, utilizando las relaciones de cardinalidad entre “puntos originales” - asociados a tramos de 50 m. de costa - y “rectángulos de representación”. Ello se realiza mediante la asignación del valor medio a los rectángulos de la representación cartográfica.

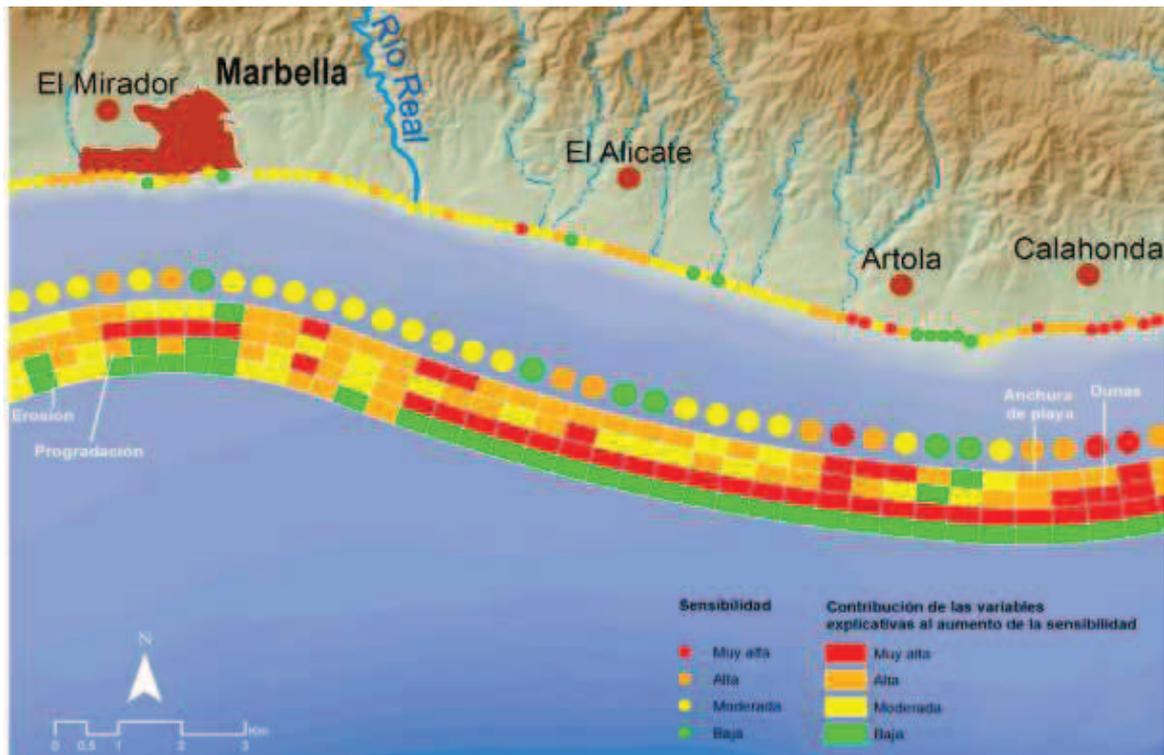


Figura 4.35. Representación del indicador de sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico y las variables explicativas.
Fuente: extraído de Ojeda et al. (2013).

4.4.- RESULTADOS DE LA DIFUSIÓN WEB

Tal y como ya se ha comentado en apartados previos, la estrategia de difusión web planteada para los resultados de esta investigación se plasma en la elaboración de servicios interoperables que son visualizados a través de un geovisor web que, partiendo del prototipo desarrollado por el Grupo de Investigación, es adaptado y mejorado para mostrar los resultados de esta Tesis Doctoral. La labor del doctorando en este apartado, al ser el experto temático integrado en el equipo de desarrollo, ha resultado de gran importancia, pues de la formación temática depende la correcta representación y visualización de los datos. La elección de los puntos como mejor forma de representación espacial de los resultados, su integración en la base de datos espacial y el diseño de la misma pensando en las potencialidades del visor, la aplicación de semiología adecuada, la realización de las fichas y leyendas que caracterizan y describen cada servicio interoperable, el diseño y la ordenación de las vistas personalizadas o la selección de información que puedan servir de base para la correcta lectura e interpretación de las tasas de erosión, han constituido la mayor parte de su labor en este apartado.

A lo largo de los apartados siguientes se describirán los servicios interoperables y el prototipo del visor web desarrollado.

4.4.1.- SERVICIOS INTEROPERABLES *OGC*

Como resultado de esta Tesis Doctoral se han generado alrededor de 110 servicios interoperables.

Todos los servicios se encuentran disponibles para su uso en la red³⁵ y, al seguir los estándares *OGC*, pueden ser visualizados a través de cualquier software libre o propietario (ver Figura 4.36).

La Tabla 4.5 muestra el listado de servicios interoperables generados para esta Tesis Doctoral derivados del proceso de digitalización e interpretación, así como en el proceso de cálculo de tasas e indicadores. Se han generado 27 servicios de geometría lineal representativos del modelo de línea de costa de 2011 (el más actualizado), así como las alteraciones antrópicas para cada fecha analizada. Se han representado

³⁵ <http://viv3.cica.es:8092/geoserver/litoral/wms>

también las líneas de costa levantadas para el cálculo de las tasas de erosión de cada una de las fechas y *proxies* utilizados (*backshore/foredune* y *HWL*), así como los servicios vinculados a la fecha de vuelo, esenciales para el correcto análisis de los resultados de tasas de erosión. Por último, se han representado los servicios vinculados al proceso de cálculo (transectos, líneas de base, tramos costeros y límites de las unidades fisiográficas). Tanto en la fase de fotointerpretación y digitalización como en la fase de cálculo, todos los servicios tienen geometría lineal.

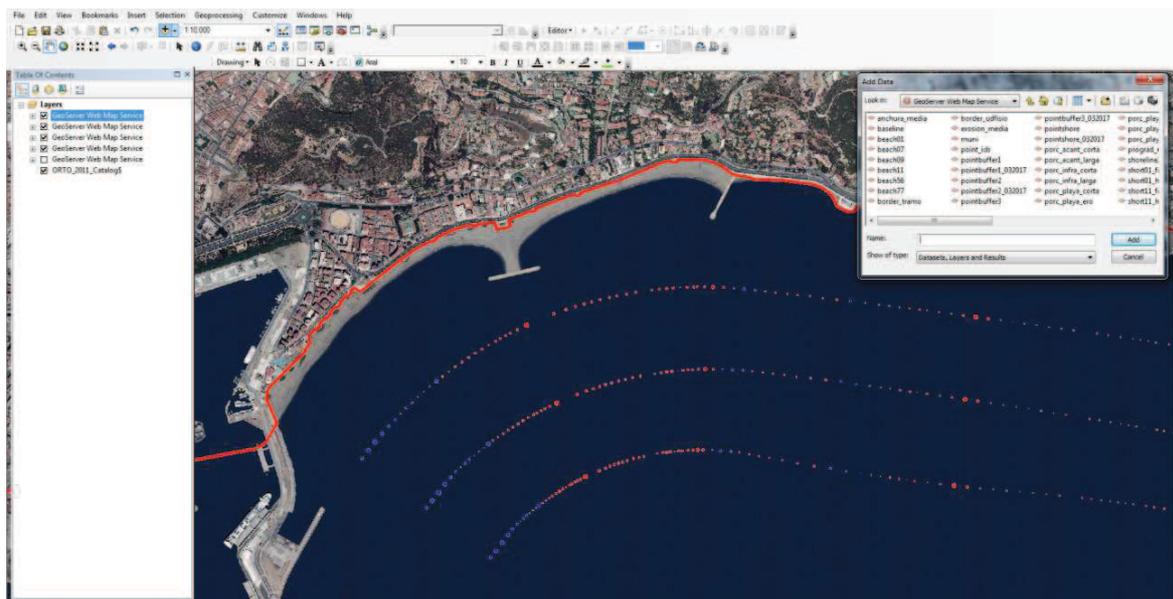


Figura 4.36. Visualización de los servicios interoperables generados mediante el software ArcGIS®. Fuente: Elaboración propia.

	Nombre	Capa
PROCESO DE FOTOINTERPRETACIÓN Y DIGITALIZACIÓN	Modelo de línea de costa 2011	lineam_11
	Línea fisiográfica 2011 nivel 1	nivel_1_largaQ
	Playas en 2011	playas_larga
	Acantilados en 2011	acantilados_erosion
	Dunas en 2011	dunas_erosion
	Infraestructuras en 2011	linea_costa_Infraestructuras
	Márgenes y estuarios en 2011	margenes_estuarios_canyons_larga
	Alteraciones antrópicas en 1956	vw_alteraciones56
	Alteraciones antrópicas en 1977	vw_alteraciones77
	Alteraciones antrópicas en 2001	vw_alteraciones01
	Alteraciones antrópicas en 2011	vw_alteraciones11

	Fecha de vuelo 1956	short56_fd_fecha
	Fecha de vuelo 1977	Short77_fd_fecha
	Fecha de vuelo 2001	Short01_fd_fecha
	Fecha de vuelo 2011	Short11_fd_fecha
	Línea de erosión 1956 Marca húmeda	Short56_hw
	Línea de erosión 1977 Marca húmeda	Short77_hw
	Línea de erosión 2001 Marca húmeda	Short01_hw
	Línea de erosión 2011 Marca húmeda	short11_hw
	Línea de erosión 1956 Foredune	Short56_fd
	Línea de erosión 1977 Foredune	Short77_fd
	Línea de erosión 2001 Foredune	Short01_fd
	Línea de erosión 2011 Foredune	Short11_fd
	PROCESO DE CÁLCULO	Línea base
Transectos		Transects
Delimitación tramos de estudio		border_tramo
Delimitación Unidades fisiográficas		border_udfisisio

Tabla 4.5. Lista de servicios interoperables generados durante los procesos de cálculo interpretación y digitalización.
Fuente: elaboración propia.

Atendiendo a los servicios elaborados en la fase de resultados, estos quedan recogidos en las Tablas 4.6. , 4.7. y 4.8. En el caso de las tasas de erosión (Tabla 4.6), el lector podrá observar la presentación de su cálculo para los diferentes períodos y en los 2 *proxies* utilizados (*Proxy 1: backshore/foredune –FD-* y *Proxy 2: marca húmeda –MH-*). La geometría utilizada, tal y como se describe en los apartados 3.4.3 y 3.5.2, corresponde a 4 entidades puntuales representadas a distancias de la línea de costa:

- ⇒ *Pointshore* representa los resultados en puntos sobre la línea de costa.
- ⇒ *Pointbuffer1* representa los resultados a una distancia de 450 m. de la costa.
- ⇒ *Pointbuffer2* a una distancia de 800 m. de la costa.
- ⇒ *Pointbuffer3* a una distancia de 1150 m.

Posteriormente, sobre estas 4 capas se aplicará el estilo que se quiera representar. De este modo, se disponen de 4 capas puntuales sobre los que se aplican 10 estilos diferentes para 5 períodos distintos, obteniéndose un total de 40 servicios interoperables diferentes.

Tal y como ya se comentó en el apartado 3.5.2, la elección de estas 4 entidades geométricas facilita una cómoda comparación de los resultados en los subperíodos anteriormente mencionados (ver figura 4.28), respondiendo a las necesidades visuales que la cartografía y escala de representación requieren.

	Período	Proxy	Nombre	Capa	Style
RESULTADOS TASAS DE EROSIÓN	1956 - 2011	1	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 FD representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_5611hw
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 FD representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 FD representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 FD representada 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
		2	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 MH representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_5611
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 MH representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 MH representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-2011 MH representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
	1956 - 1977	1	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 FD representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_5677hw
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 FD representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 FD representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 FD representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
		2	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 MH representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_5677
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 MH representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 MH representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1956-1977 MH representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
1977 - 2001	1	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 FD representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_7701hw	
		Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 FD representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>		
		Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 FD representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>		
		Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 FD representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>		

RESULTADOS TASAS DE EROSIÓN		2	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 MH representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_7701	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 MH representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>		
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 MH representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>		
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2001 MH representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>		
	1977 - 2011	1	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 FD representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_7711hw	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 FD representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>		
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 FD representada 800 m	<i>pointbuffer2</i>		
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 FD representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>		
		2	Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 MH representada <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_7711	
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 MH representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>		
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 MH representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>		
			Tasas de erosión para el litoral andaluz 1977-2011 MH representada 1150 m	<i>pointbuffer3</i>		
		2001-2011	1	Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 FD representadas <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	ero_0111hw
				Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 FD representadas 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
				Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 FD representadas 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
				Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 FD representadas 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
2	Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 MH representadas <i>onshore</i>		<i>pointshore</i>	ero_0111		
	Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 MH representadas 450 m		<i>pointbuffer1</i>			
	Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 MH representadas 800 m		<i>pointbuffer2</i>			
	Tasas de erosión para el litoral andaluz 2001-2011 MH representadas 1150 m		<i>pointbuffer3</i>			

Tabla 4.6. Servicios interoperables vinculados a los resultados de las tasas de erosión.
Fuente: elaboración propia.

Respecto a los servicios interoperables generados a partir de resultados vinculados a la evolución de la playa útil (ver Tabla 4.7), estos se muestran para cada uno de los periodos analizados (1956-2011, 1956-1977, 1977- 2001 y 2001-2011).

La geometría de representación son los mismos puntos utilizados para la representación de las tasas de erosión (*Pointshore*, *Pointbuffer1*, *Pointbuffer2* y *Pointbuffer3*), sobre los que se ha aplicado el estilo que se quiera representar. De este modo se disponen de 5 capas puntales sobre los que se aplican 4 estilos diferentes obteniéndose un total de 20 servicios interoperables diferentes.

	Período	Nombre	Capa	Style
RESULTADOS EVOLUCION PLAYA ÚTIL	1956-2011	Evolución de la playa útil para el período 1956-2011 representada <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	evo_5611wi
		Evolución de la playa útil para el período 1956-2011 representada a 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1956-2011 representada a 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1956-2011 representada a 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
	1956-1977	Evolución de la playa útil para el período 1956-1977 representada <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	evo_5677wi
		Evolución de la playa útil para el período 1956-1977 representada a 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1956-1977 representada a 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1956-1977 representada a 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
	1977-2001	Evolución de la playa útil para el período 1977-2001 representada <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	evo_7701wi
		Evolución de la playa útil para el período 1977-2001 representada a 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1977-2001 representada a 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1977-2001 representada a 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
	1977-2011	Evolución de la playa útil para el período 1977-2011 representada <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	evo_7711wi
		Evolución de la playa útil para el período 1977-2011 representada a 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1977-2011 representada a 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 1977-2011 representada a 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	
	2001-2011	Evolución de la playa útil para el período 2001-2011 representada <i>onshore</i>	<i>pointshore</i>	evo_0111wi
		Evolución de la playa útil para el período 2001-2011 representada a 450 m	<i>pointbuffer1</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 2001-2011 representada a 800 m	<i>pointbuffer2</i>	
		Evolución de la playa útil para el período 2001-2011 representada a 1150 m	<i>pointbuffer3</i>	

Tabla 4.7. Servicios interoperables vinculados a los resultados de evolución de la playa útil.
Fuente: elaboración propia.

Se han generado otros servicios vinculados a la playa útil para todas las fechas disponibles (poligonal y puntual), así como otros indicadores de interés estadístico procedentes del modelo de datos de línea de costa municipales que pueden resultar de interés para la Administración (Tabla 4.8).

	Nombre	Capa	Geometría
PLAYA ÚTIL	Playa útil 1956	<i>vw_playa_util56</i>	Puntual
	Playa útil 1977	<i>vw_playa_util77</i>	
	Playa útil 2001	<i>vw_playa_util01</i>	
	Playa útil 2011	<i>vw_playa_util5611</i>	
	Playa útil 1956	<i>beach56</i>	Poligonal
	Playa útil 1977	<i>beach77</i>	
	Playa útil 2001	<i>beach01</i>	
	Playa útil 2011	<i>beach11</i>	
OTROS INDICADORES DE INTERÉS ESTADÍSTICO	Porcentaje de longitud de playas por municipio en la Línea de costa larga	<i>porc_playa_larga</i>	Poligonal
	Porcentaje de longitud de playas por municipio en la Línea de costa corta	<i>porc_playa_corta</i>	
	Porcentaje de longitud de costa rocosa por municipio en la Línea de costa	<i>porc_acant_corta</i>	
	Porcentaje de longitud de costa rocosa por municipio en la Línea de costa	<i>porc_acant_larga</i>	
	Porcentaje de longitud de costa antropizada por municipio en la Línea de	<i>porc_infra_corta</i>	
	Porcentaje de longitud de costa antropizada por municipio en la Línea de	<i>porc_infra_larga</i>	
	Porcentaje de longitud de playas erosivas 1977-2011 por municipio	<i>porc_playa_ero</i>	
	Porcentaje de longitud de playas progradantes 1977-2011 por municipio	<i>porc_playa_pro</i>	
	Porcentaje de longitud de playas estables 1977-2011 por municipio	<i>porc_playa_est</i>	

Tabla 4.8. Servicios interoperables vinculados a los resultados de evolución de la playa útil poligonal e indicadores de interés para la Administración e indicador de sensibilidad.

Fuente: elaboración propia.

Por último, se han generado los servicios vinculados al índice de sensibilidad de playas (ver Tabla 4.9). La estrategia planteada para la difusión web de este índice se ha basado en su representación mediante distintos puntos de cálculo para escalas inferiores y superiores a 1:200.000. El índice se ha presentado junto con sus variables, representadas en rectángulos paralelos a la costa y asociados a tramos de 50 m. de

costa. Ello se realiza mediante la asignación del valor medio a los rectángulos de la representación cartográfica, utilizados previamente para la representación del ya mencionado Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI).

Además de los servicios generados, los usuarios expertos tienen la posibilidad, mediante uso de la herramienta para especialistas desarrollada en el geovisor, de generar filtros espaciales o alfanuméricos en tiempo real sobre los servicios interoperables descritos. Así, los usuarios especialistas pueden elegir la variable que deseen de las determinadas en la interfaz de usuario, definir el ámbito espacial y el rango de la variable y generar en tiempo real cartografía dinámica “a demanda” (*on the fly*). Estos servicios serán comentados con mayor profundidad en el apartado 4.4.2 (herramienta para especialistas).

	Nombre	Capa	Geometría
RESULTADOS ÍNDICE SENSIBILIDAD	Indicador sensibilidad en puntos de cálculo. Escalas superiores a 1:200000	<i>puntos_calculo</i>	Puntual
	Indicador sensibilidad en puntos de cálculo. Escalas inferiores a 1:200000	<i>puntos_simply</i>	
	Indicador en los polígonos representado mediante puntos	<i>indicador_puntos</i>	
	Variable anchura de la playa en polígonos	<i>anchura_poly</i>	Poligonal
	Variable duna en polígonos	<i>duna_poly</i>	
	Variable erosión positiva en polígonos	<i>erosion_positiva_poly</i>	
	Variable erosión negativa en polígonos	<i>erosion_negativa_poly</i>	

Tabla 4.9. Servicios interoperables vinculados al índice de sensibilidad de playas.
Fuente: elaboración propia.

4.4.2.- GEOVISOR WEB

La generación de un **geovisor web**, alimentado por los servicios interoperables OGC recogidos en el epígrafe anterior, constituye otro de los resultados de esta Tesis y casi una necesidad por los motivos expuestos con anterioridad (diversidad de *proxies*, períodos de análisis, escala de detalle, etc.), los cuales hacían inviable la representación cartográfica de las tasas e indicadores calculados por medios convencionales (anexos cartográficos en formato analógico o digital). En este sentido, el visor incorpora un conjunto de funcionalidades que permite la geovisualización multiescalar (exigida por la escala de trabajo) de todos los elementos de la base de datos espacial (líneas de costa, tasas de erosión con diferentes *proxies*, indicadores, etc.), proporcionando al usuario una visión completa de todo el trabajo realizado. En cierta medida, sería el sustituto de un anexo cartográfico por una especie de “Atlas Digital interactivo de las tasas de erosión”, ampliando las funcionalidades meramente cartográficas (información complementaria en *pdf*, acceso a información temática complementaria, etc.).

En el geovisor "Erosion_Tesis_Doctoral"³⁶ (ver Figura 4.37) pueden encontrarse todos los resultados de la tesis doctoral. El geovisor cuenta con un manual de funcionamiento al que es posible acceder a través de un botón localizado en la barra superior. Entendemos que acceder al visor y utilizar su manual constituye la mejor manera de mostrar al usuario sus funcionalidades. Por este motivo, se mostrarán aquí sólo algunas de las más destacadas. El geovisor desarrollado agrupa 2 conjuntos de funcionalidades diferenciadas:

FUNCIONALIDADES PARA USUARIOS GENERALISTAS

⇒ **Acceso a los datos:** el usuario del visor cuenta con un **catálogo** (Figura 4.37) que incorpora de manera ordenada, siguiendo la estructura descrita en el apartado anterior, todos los servicios interoperables generados así como otros servicios externos, que resultan de gran interés para el análisis e interpretación de las tasas de erosión. Destacan **3 carpetas** principales cuyo contenido ya han sido descritas en el apartado anterior:

- Proceso de interpretación y digitalización de las líneas de costa.
- Proceso de cálculo.
- Resultados de esta Tesis Doctoral.

³⁶ https://www.nacional_2.gis-and-coast.org/

Es importante mencionar la posibilidad adicional, por parte del usuario, de acceder a información que habiendo sido calculada en el proceso de análisis, no se ha integrado en el texto por motivos de espacio y por no haber sido incluido entre los objetivos específicos. Este es el caso, por ejemplo, de **la representación de las tasas de erosión para todos los períodos temporales de análisis en el proxy 2 (última marca húmeda de la marea alta) y la evolución temporal de la anchura de la playa (proxy 3).**

Se han incorporado los servicios interoperables de las Ortofotografías utilizadas en la Tesis Doctoral, así como servicios que recogen bases de referencia (mapas topográficos) e información temática (mapas geológicos).

Junto a ello, el usuario puede incorporar, a través del menú de capas, otros servicios interoperables *WMS* y *WMTS*.

Por otro lado, el usuario tiene acceso a través del icono de información a **fichas descriptivas del contenido de cada carpeta del catálogo.** Estas fichas también están disponibles para cada servicio interoperable.

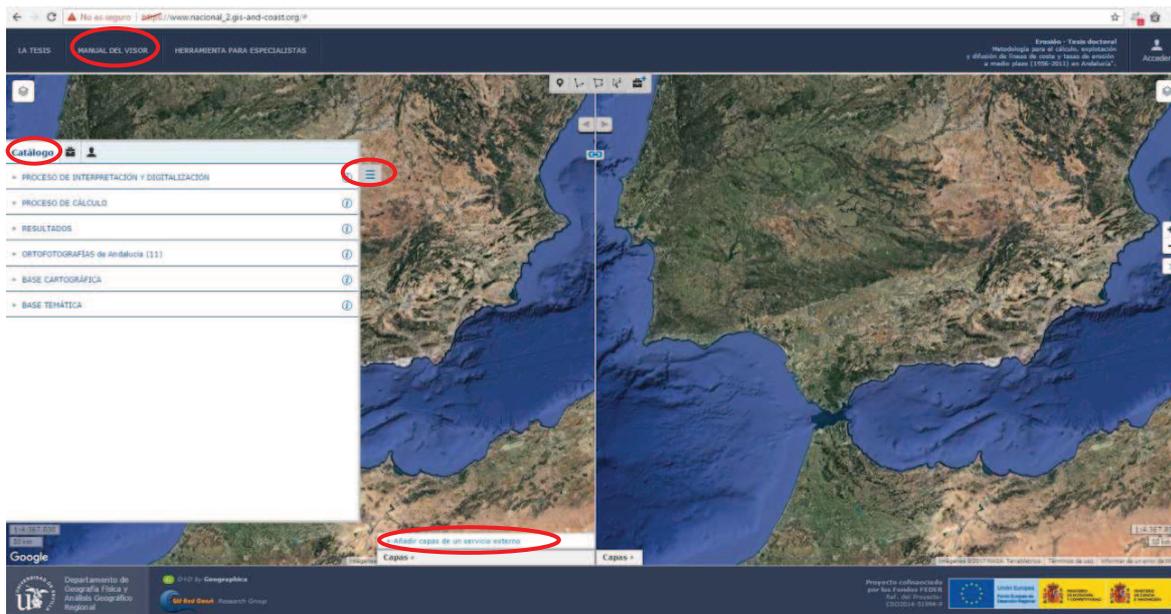


Figura 4.37. Interfaz del geovisor "Erosion_Tesis_Doctoral".
Fuente: elaboración propia.

⇒ **Geovisualización multiescalar:** El visor permite la geovisualización multiescalar de información **en una o dos ventanas** que pueden ser o no sincronizadas. La Figura 4.38 muestra un ejemplo del uso de estas funcionalidades. Así, en la ventana izquierda el usuario puede observar la variable tasas de erosión en el *proxy 1* (límite de la playa alta con la duna costera) y la representación de las tasas de erosión para el mismo periodo

utilizando el *proxy 2* (marca húmeda de la marea alta) para varios periodos de análisis.

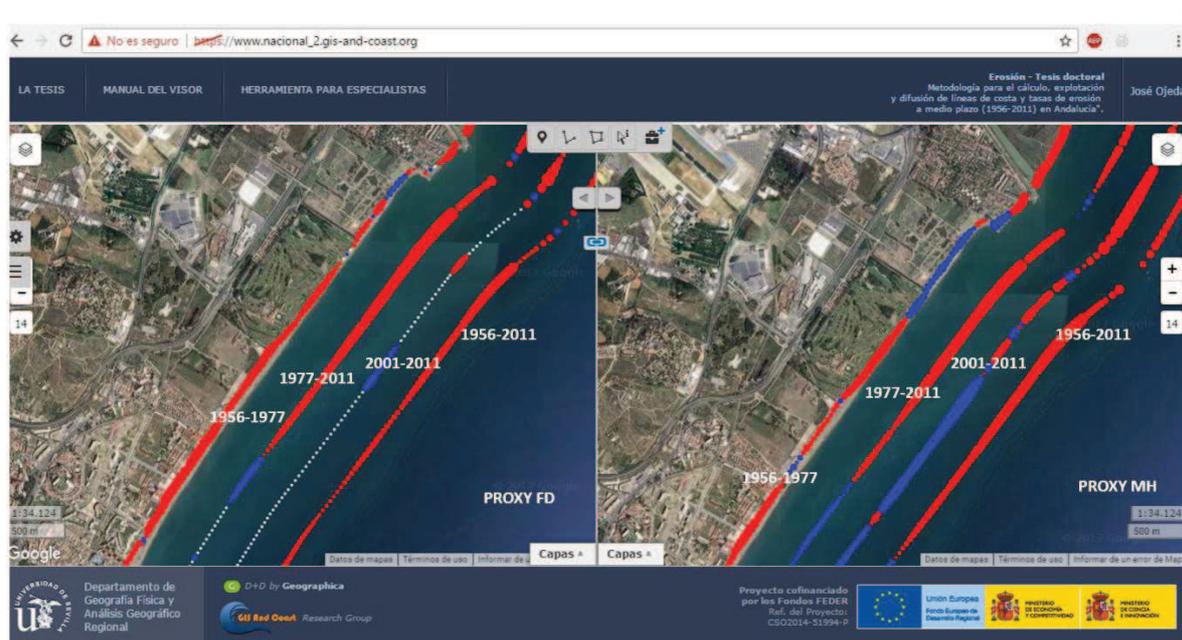


Figura 4.38. Representación de las tasas de erosión para varios períodos en ambos *proxies*. Fuente: elaboración propia.

Otra opción es visualizar, a varias escalas, la representación de las tasas de los 3 *proxies* utilizados para el mismo período temporal de análisis (Figura 4.39).

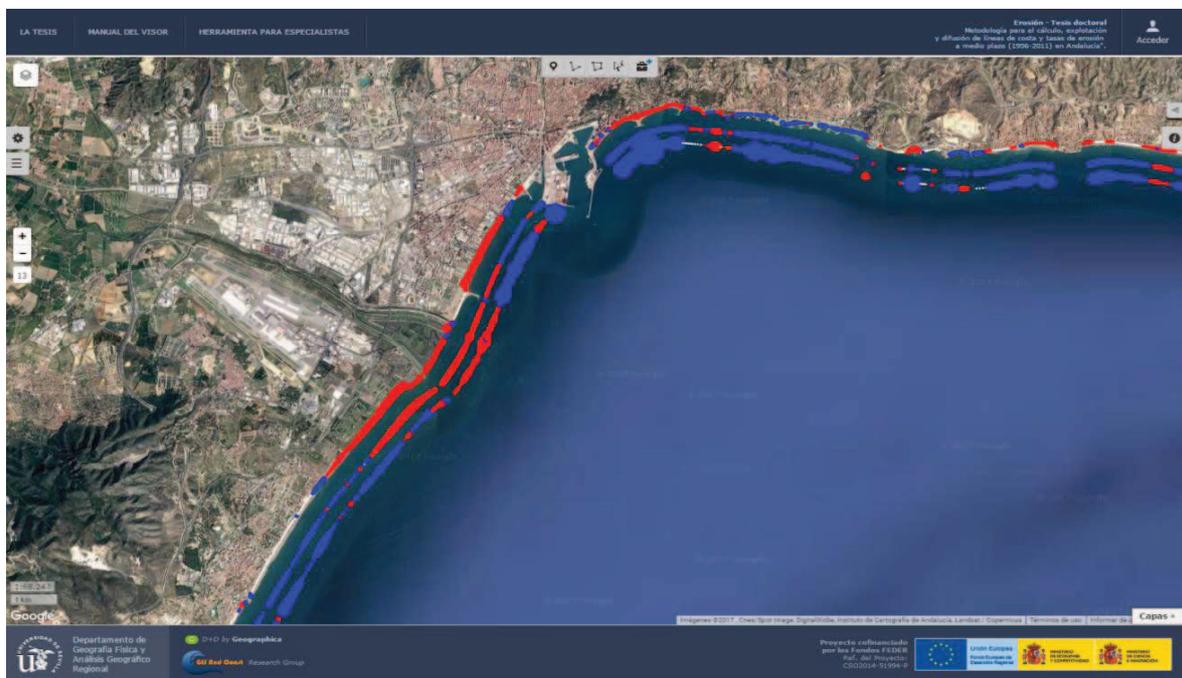


Figura 4.39. Representación de los tres *proxies* (*foredune/backshore*, marca húmeda y anchura playa) para un único período (1977-2011). Fuente: Elaboración propia.

⇒ **Vistas personalizadas:** el usuario puede acceder a través del icono (localizado junto al catálogo) a un conjunto de proyectos (vistas personalizadas). Se han elaborado 7 vistas personalizadas (ver Figura 4.40). La primera de ellas incorpora servicios vinculados a una descripción y caracterización del área de estudio, el resto, recoge los resultados de **tasas de erosión para cada tramo de estudio** mientras que el último recopila servicios vinculados a otros resultados.

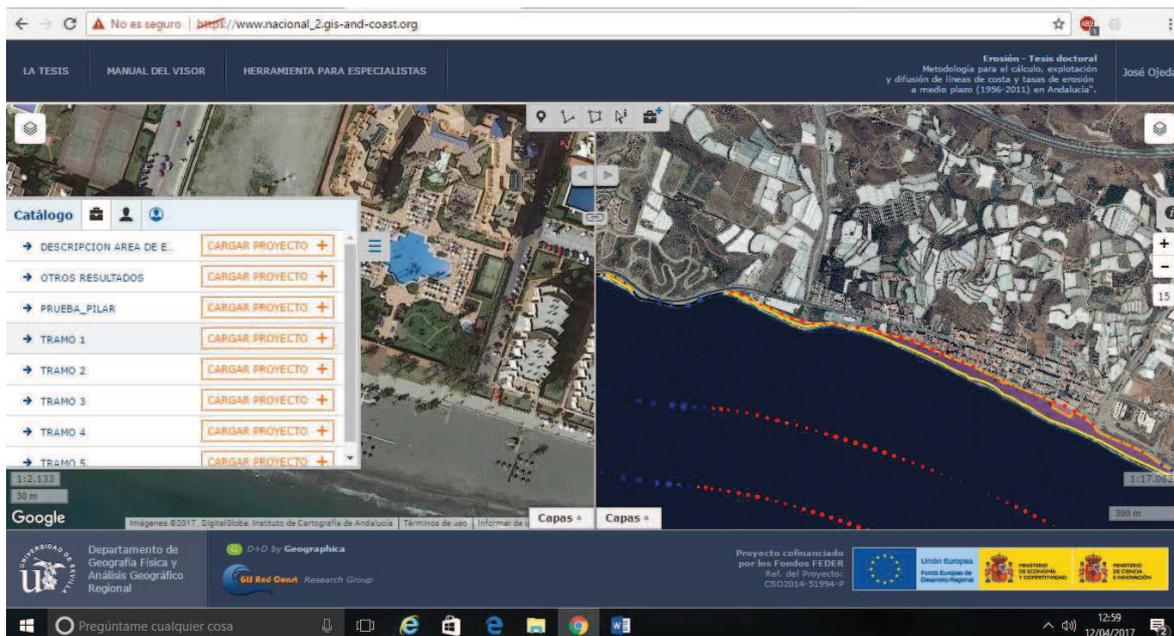


Figura 4.40. Pestaña de despliegue de los proyectos generados.
Fuente: elaboración propia.

⇒ **Herramientas complementarias:** el visor presenta un conjunto de herramientas complementarias, de interés de cara la interpretación de los datos y control de calidad de los mismos. Entre ellas destacamos:

- Geolocalización *GPS*.
- Acceso a las funcionalidades de *Street View* a través de la API de Google (ver Figura 4.41).

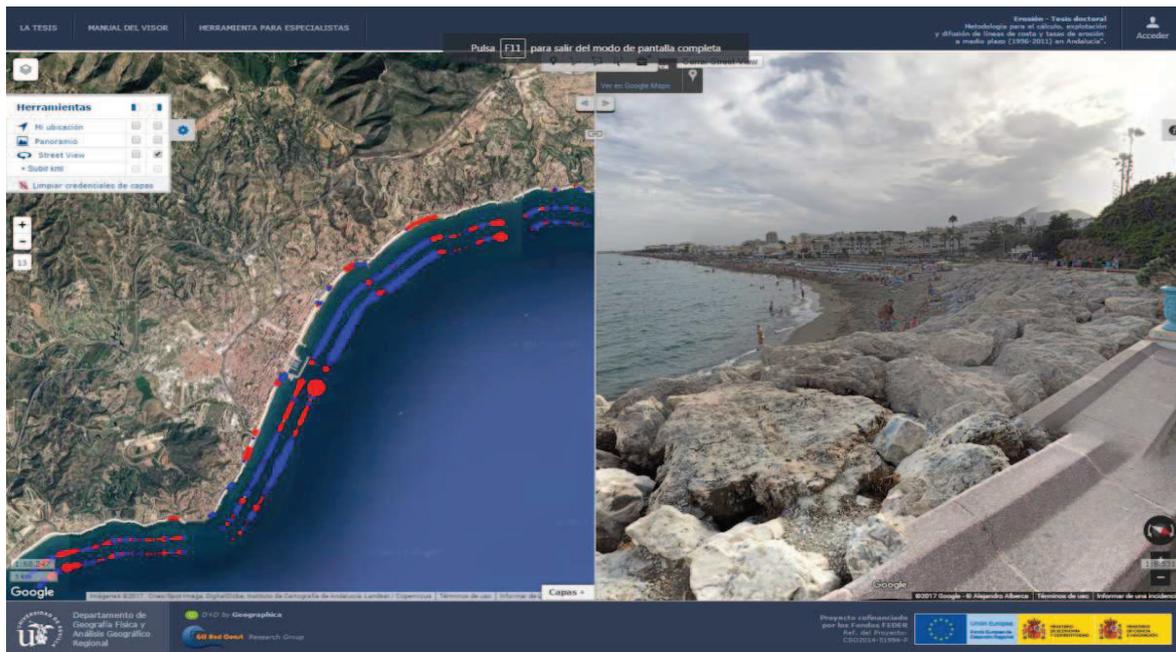


Figura 4.41. Representación de los 3 proxies (foredune/backshore, marca húmeda y anchura de playa) en la ventana de la izquierda y acceso a Street View en la derecha.

Fuente: Elaboración propia.

FUNCIONALIDADES DE LA HERRAMIENTA PARA USUARIOS ESPECIALISTAS

El visor permite mediante un botón localizado en la barra superior acceder a la **"herramienta para especialistas"**. A través del ella es posible disponer de otras funcionalidades que resultan de gran importancia para el usuario especialista. Se basa en un visor desarrollado con las librerías Openlayer que recoge las funcionalidades que, según el criterio del Grupo de Investigación, necesitaría un usuario experto que no sólo demandase información más detallada o agregada espacialmente, sino que necesitase otras vías de exploración de los datos (gráficos, cálculo de indicadores espacializados, etc.). Por ello, en esta herramienta se ha incluido:

⇒ **Utilidades para la geovisualización "a demanda"**: una vez localizado en la interfaz de esta herramienta (Figura 4.42), el usuario debe seleccionar en primer lugar la capa sobre la que se va a representar la información (**pestaña capas**):

- Puntos sobre la línea de costa.
- Puntos a una distancia de 450 m de la costa.
- Puntos a una distancia de 800 m de la costa.
- Puntos a una distancia de 1150 metros.

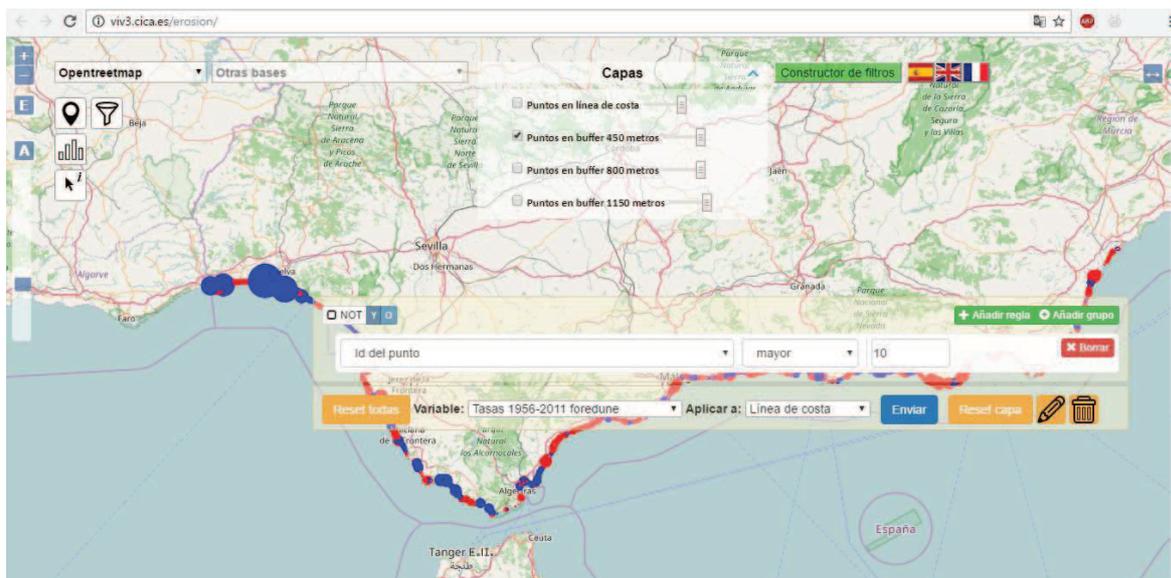


Figura 4.42. Interfaz de la herramienta para especialistas.
Fuente: elaboración propia.

Por defecto, se representa las tasas de erosión para el período 1956-2011 calculadas con el *proxy 1 (backshore/foredune)*. Posteriormente, el usuario con el “**constructor de filtros**” puede representar cualquiera de las variables disponibles (más de 50), e incluso comparar 2 variables entre sí. Así, por ejemplo, es posible observar la representación de las tasas de erosión sobre los puntos de línea de costa que poseen dunas costeras (ver Figura 4.43), o identificar aquellos tramos de línea de costa un comportamiento erosivo histórico (ver Figura 4.44).

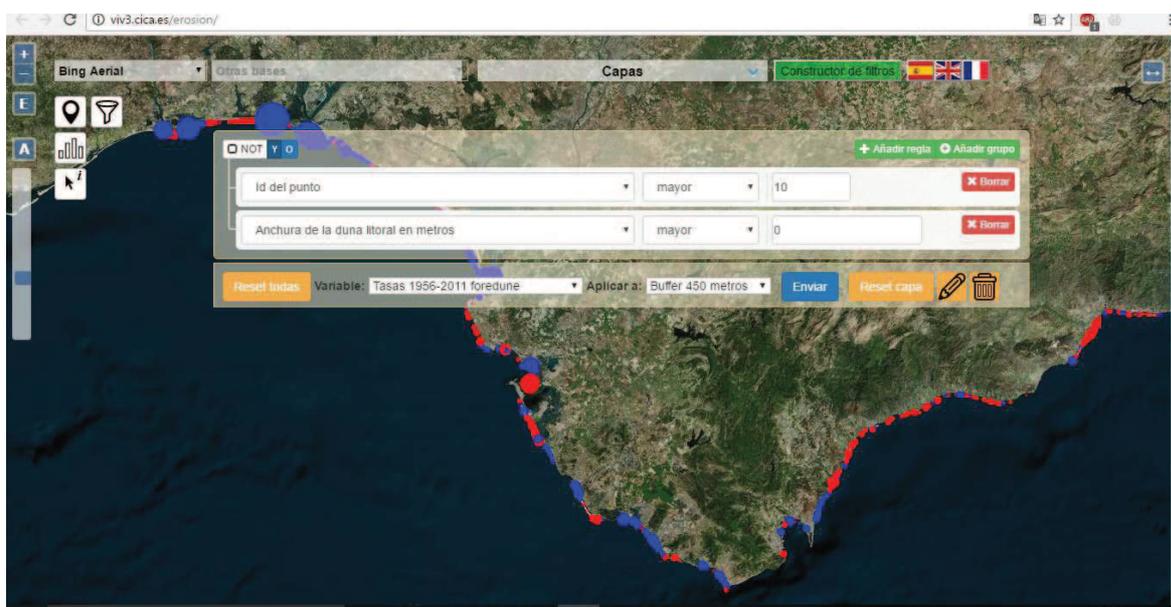


Figura 4.43. Representación en la herramienta para especialistas de las tasas de erosión 1956-2011 para tramos que poseen dunas costeras.
Fuente: elaboración propia.

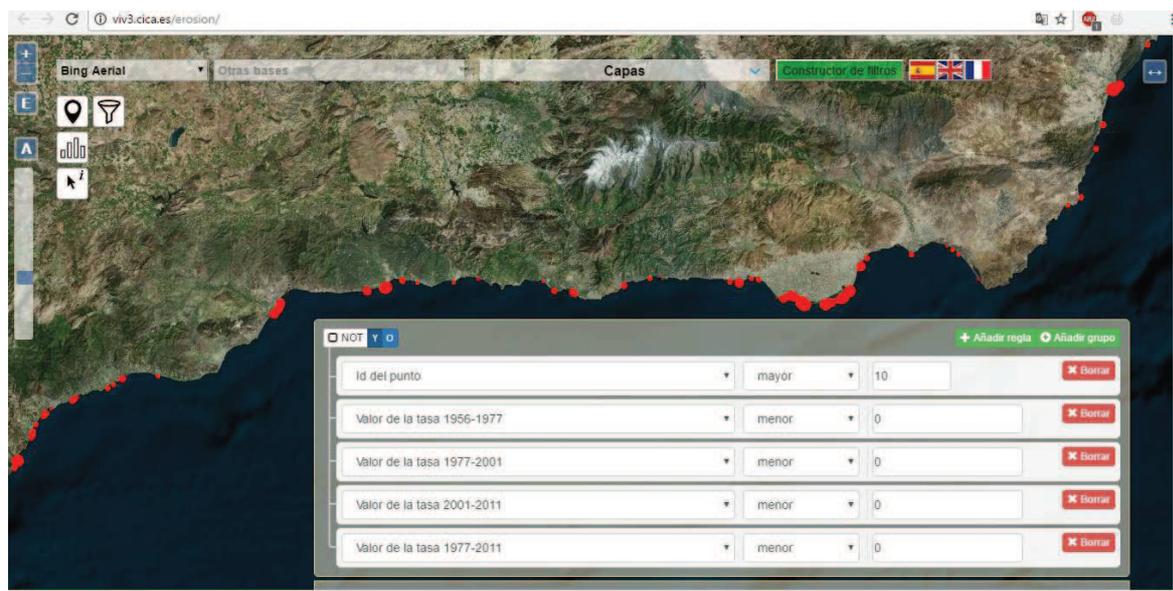


Figura 4.44. Representación de los puntos de la costa con comportamiento erosivo histórico.
Fuente: elaboración propia

⇒ **Utilidades para la exploración estadística de los datos:** además de posibilitar la geovisualización procedente de filtros a demanda que el usuario realiza sobre las variables, esta aplicación posibilita la exploración estadística de los datos representados mediante la realización de **gráficos** de medias o de series para cada tramo o entidad geográfica seleccionada (Figuras 4.45 y 4.46) y **el cálculo de estadísticos**. Ambos, gráficos y estadísticos son actualizables en tiempo real.



Figura 4.45. Gráficos y estadísticos calculados y actualizables en tiempo real. Puntos erosivos para todos los periodos.
Fuente: elaboración propia.

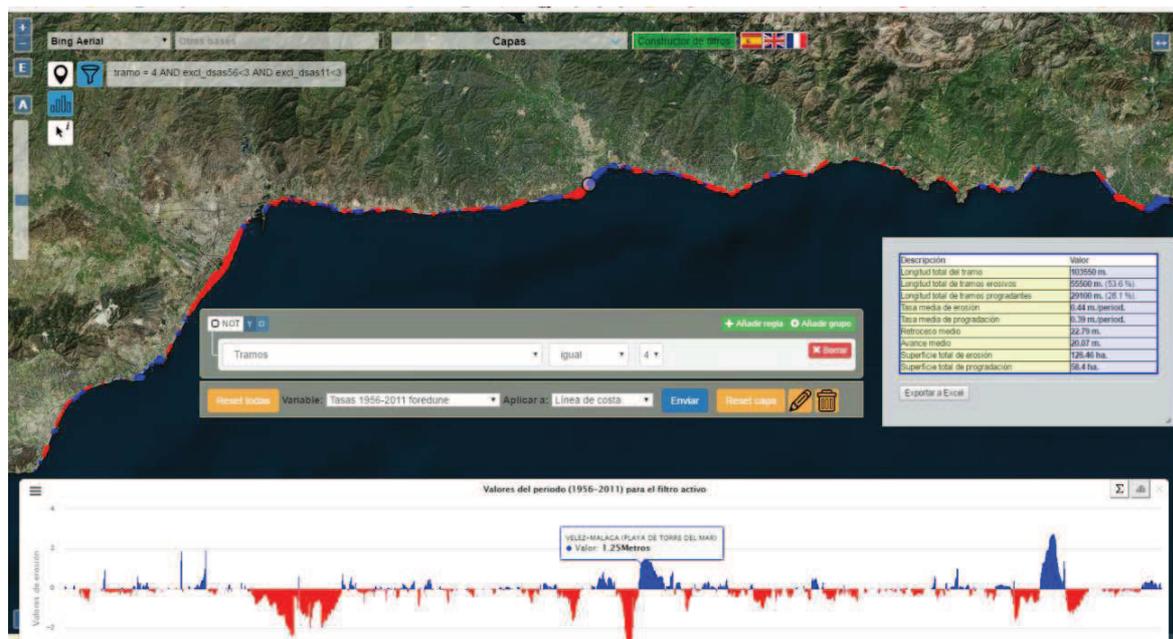
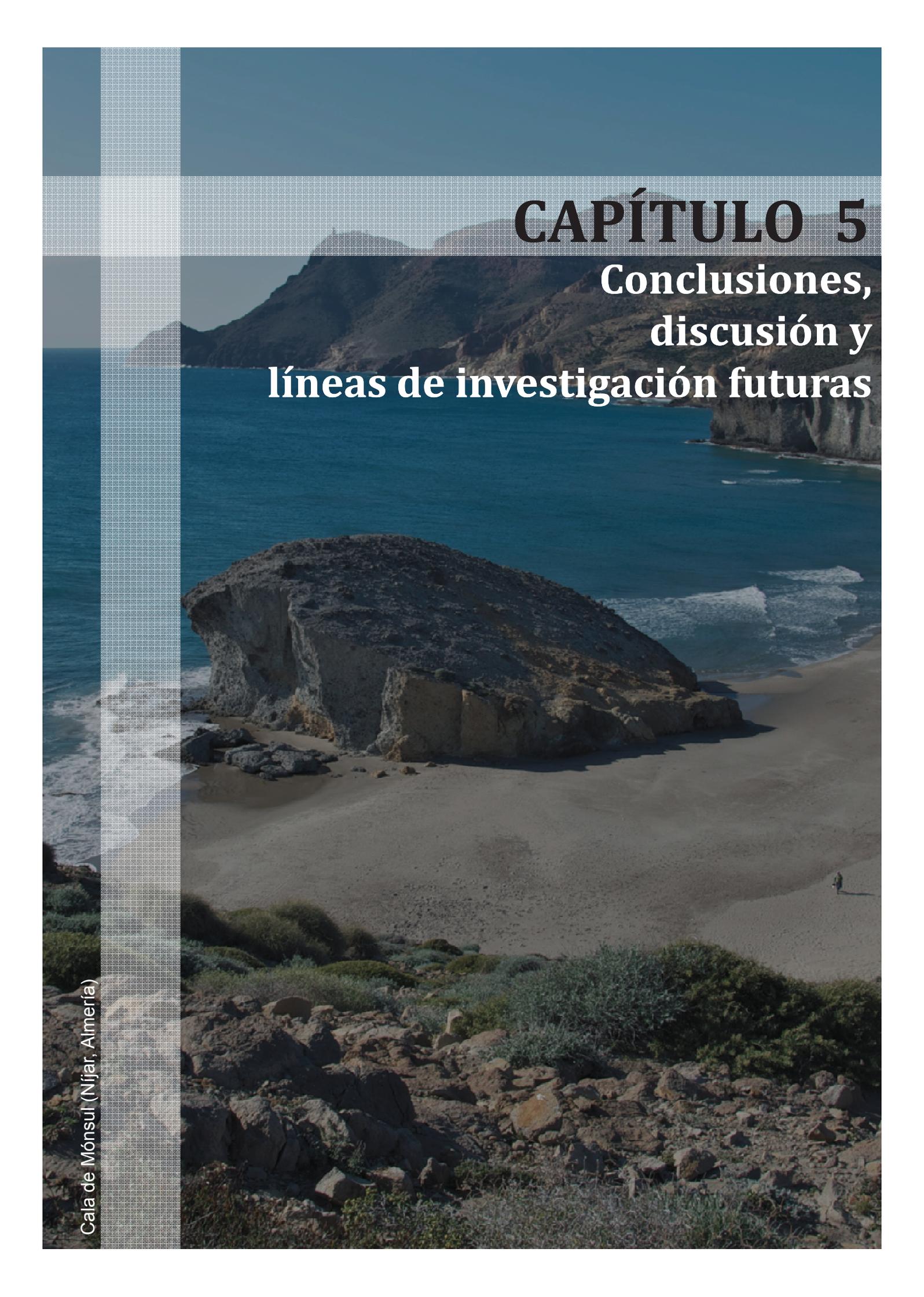


Figura 4.46. Gráficos y estadísticos calculados y actualizables en tiempo real. Tasas para el período de referencia (1977-2011).
Fuente: elaboración propia.

Tal y como puede observarse, el visor desarrollado, constituye una potente herramienta no sólo para la difusión y visualización sino también para el análisis e interpretación futura de los resultados obtenidos. En este apartado se ha tratado de describir las principales funcionalidades, no obstante, se recomienda al lector de esta Tesis o usuario especializado su utilización para apreciar toda su potencialidad.



CAPÍTULO 5

Conclusiones, discusión y líneas de investigación futuras

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

5.1.- CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Este capítulo final de **conclusiones** se ha redactado siguiendo la misma estructura que se expuso para los objetivos e hipótesis de partida, incorporando una continua alusión al grado de acuerdo o innovación en relación con los trabajos precedentes (**discusión**) y enfatizando las principales aportaciones metodológicas o en los resultados que se han revelado en el desarrollo de esta Tesis.

5.1.1.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 1

Realizar una propuesta metodológica para el proceso de fotointerpretación, identificación y digitalización de las líneas de costa para las fechas de referencia utilizando varios indicadores de línea de costa (*feature-based proxies*), pero realizados por un único fotointérprete para un conjunto de ortofotografías actuales e históricas disponibles en Andalucía.

En este trabajo ha quedado constatado que la única fuente de información que permite un cálculo retrospectivo de las tasas de erosión a medio-largo plazo y a escalas de detalle son los **vuelos fotogramétricos**, coincidiendo en ello con las numerosas publicaciones que ya habían utilizado esta fuente de información (Dolan, 1978, 1980; Borrego, 2000; Morton, 2004; Del Río, 2007). Sin embargo, dado el análisis de las

peculiaridades geométricas impuestas por la singular perspectiva cónica de las cámaras fotográficas aerotransportadas, queda comprobado que la única forma de disponer de un producto derivado con la suficiente consistencia geométrica para una zona de estudio del tamaño de la costa andaluza es la utilización de **ortofotografías** procedentes de la restitución fotogramétrica (orientación interior, exterior, triangulación, etc.), siendo inviable las correcciones polinómicas con puntos de control (por ser transformaciones locales para cada fotograma) tan frecuentes en la bibliografía (Fletcher, 2003; Appeaning, 2013; Sánchez, 2015; Ibarra, 2016). Por ello se considera que, dado el acceso público gratuito a estas fuentes, realizadas también para vuelos fotogramétricos históricos (1956-1957 y 1977-1983) en el caso de la administración andaluza (Vales et al., 2010), la **elección de este tipo de fuente de datos es la más consistente desde la perspectiva de la calidad geométrica de la misma y de la extensión de la zona de estudio**. La extensión de la zona de estudio es, sin duda, una de las principales aportaciones de esta Tesis Doctoral por **no existir precedentes de trabajos que analicen la totalidad de la costa andaluza, salvo los realizados previamente por el Grupo de Investigación en el que se integra el autor de la misma** (Ojeda et al., 2009, 2013; Díaz et al., 2012).

Otra de las singularidades y principales de aportaciones de ésta deriva **del tipo de indicador de línea de costa (*proxy*) elegido** y de la propuesta **metodológica para su digitalización**:

- ⇒ En relación al indicador elegido, los únicos posibles son del tipo denominado en la literatura científica *feature-based proxy*, dada la imposibilidad de la utilización de la altimetría (*datum-based proxy*) en las ortofotografías. Adoptado este tipo de *proxies*, se ha optado, ante la variedad existente dentro del mismo (base acantilada, duna litoral, infraestructura, límite del *runup*, marca de agua instantánea, pleamar media –*MHW*-, etc.), por el más recomendado en la bibliografía científica para los estudios a medio-largo plazo: **línea de contacto entre la parte superior de la playa seca (*backshore*) y la duna costera (*foredune*) acantilados o infraestructura** (Muñoz y Enríquez, 1998; Anfuso, 2001; Del Río, 2007). Aunque ha sido éste el utilizado para el análisis de los resultados, se han digitalizado e incluido igualmente en la base de datos espacial las líneas que reflejaban el otro *proxy* más común (***high water line - HWL-***) tras su digitalización, lo cual constituye otra de las principales aportaciones de este trabajo. **Tampoco existen precedentes de la utilización conjunta de ambos *proxies* para la totalidad de la costa de Andalucía.**

- ⇒ Quizás más relevante e innovador desde la perspectiva metodológica sea **su plasmación geométrica** una vez fotointerpretado. Generalmente se tiende a reflejar fidedignamente la geometría del *proxy* elegido, haciendo que las líneas de costa digitalizadas en las playas adosadas a formaciones sedimentarias presenten una **amplia variabilidad y sinuosidad geométrica en escasos metros** (presencia de interrupciones en las dunas costeras por accesos antrópicos o rebases del oleaje *-washover-* en episodios ligados a temporales, etc.). Se contempla pues, como una propuesta innovadora, el utilizar una **línea suavizada que una los sectores más externos de la duna** (omitiendo parte de estas pequeñas oscilaciones puntuales), partiendo de la hipótesis de que en una evolución a largo plazo (55 años), la incidencia puntual de los procesos erosivos extremos o ligados a la acción antrópica variarán de posición a lo largo de dicho período. Con esta propuesta (línea suavizada), se evalúa más fielmente el **retroceso/avance generalizado** de la costa a medio-largo plazo.
- ⇒ Sin duda, el elemento más crítico para poder abordar un estudio de todas las playas de Andalucía, dado que el *proxy* debe ser fotointerpretado, es el hecho que todo el proceso se lleve a cabo por **un sólo fotointérprete** (el autor de esta Tesis) y a una **única escala** durante el proceso de digitalización (**1:2.500**) **utilizando el software propietario ArcGis 10.3**. Aunque se puede intuir que este exigente objetivo ha sido posible por la experiencia y trabajos previos del autor en varios proyectos de investigación realizados por el Grupo, se trata de **una característica sin precedentes para un área de estudio de esta magnitud** y será la que garantizará la **posibilidad del análisis comparativo** entre los cálculos realizados para todo el ámbito de estudio. El proceso final de digitalización también conlleva una **nueva aportación metodológica** ya que, una vez digitalizadas “*ex-novo*” para 2011 y otras fechas de referencia, se ha **migrado hacia esas nuevas geometrías “la línea de costa de erosión de 2009”** procedente del modelo de datos del Grupo, “arrastrando” con ella toda la **información temática** que ésta posee (toponimia, tipología geomorfológica, anchura de duna costera...) y completándola con nueva información referente a la calidad geométrica (errores cuadráticos y potenciales), radiométrica y de integridad temporal del vuelo correspondiente.

5.1.2.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 2

Realizar una propuesta metodológica para la incorporación de la geometría e información temática de las líneas digitalizadas al conjunto de las tablas temáticas del “modelo de datos de línea de costa” definido por el Grupo de Investigación e implementado en una base de datos espacial, gestionado por PostgreSQL/PostGIS.

A diferencia de la mayor parte de los trabajos previos publicados que, finalmente, calculan las tasas una vez la geometría de las líneas de costa (*proxy*) ha sido digitalizada, dejando para posteriores trabajos su explotación y relación con otras variables, una propuesta metodológica que ha sido crítica durante el desarrollo de esta Tesis ha sido la opción de incorporar las líneas de costa digitalizadas y los atributos temáticos antes citados para las diferentes fechas a un gestor de **base de datos espacial de código abierto: PostgreSQL/PostGIS**. Si bien la propia migración de la geometría desde una *geodatabase* de software propietario ArcGis® a este gestor de bases de datos espaciales no es una tarea de gran complejidad, la gran contribución de este trabajo es **aportar un modelo de datos complejo**, al integrar las diferentes **geometrías** de la línea de costa (esenciales para el cálculo de tasas) junto a **información temática** de un doble origen:

- ⇒ La información temática “arrastrada” durante el proceso de migración de la “línea de costa de erosión” del Grupo de Investigación para 2009 (tipologías geomorfológicas, presencia de dunas costera, proximidad de elementos antrópicos, etc.) a todas las geometrías que representan la ubicación del *proxy* para las diferentes fechas de estudio utilizadas (**4 líneas de costa para cada uno de los 2 proxies digitalizados**). Esta información temática será esencial tanto para la generación y explotación de indicadores como para la difusión de los resultados.
- ⇒ La información temática generada durante el proceso de digitalización que ha conllevado:
 - La **actualización de algunos campos** de las diferentes tablas del modelo de datos de línea de costa (presencia de infraestructuras, proximidad de elementos urbanos, amplitud de la duna costera...).
 - La creación de **nuevas tablas con información temática**, que serán importantes en el proceso de análisis e interpretación de los resultados al cualificar las características de cada ortofotografía (sectores excluidos por mala geometría, sectores con mala radiometría, fecha/estación de

fotograma, etc.) y que son imprescindibles para el análisis de las tasas calculadas.

Una vez implementado este modelo de datos inicial en el gestor PostgreSQL/PostGIS, la **información espacial** (transectos y línea base) y los **resultados** de los diferentes estadísticos generados para el cálculo de las tasas de erosión se incorporaron posteriormente como **nuevas tablas al modelo de datos**. También fueron incorporados **algunos elementos geométricos nuevos** (entidades puntuales procedentes de la intersección con *buffers offshore*) de esencial inclusión para el tratamiento semiológico.

Este aspecto metodológico y **principal resultado** de este trabajo de investigación junto al diseño e implementación de **esta base de datos espacial** en PostgreSQL/PostGIS asociada a un **complejo modelo de datos**, que integra todos los elementos producidos y calculados, es un **elemento diferenciador** respecto al conjunto de los numerosos trabajos previos sobre tasas de erosión que habían sido desarrollados sobre algunos sectores, aunque de forma parcial, para la costa de Andalucía.

5.1.3.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 3

Cálculo de la tasas de erosión para diferentes períodos con la herramienta del U.S. Geological Survey, Digital Shoreline Analysis System (DSAS), así como su análisis espacial y estadístico en el contexto de una base de datos espacial.

Con las geometrías e información temática de las líneas de costa digitalizadas para las diferentes fechas, se ha procedido al cálculo de las tasas de erosión con la herramienta *DSAS*. Un procedimiento crítico en esta metodología de cálculo, por la extensión y diversidad de la línea de costa de Andalucía, es la digitalización de una adecuada “**línea base**”, la cual debe garantizar la mayor ortogonalidad posible de todos los **transectos** generados a partir de la misma respecto a los *proxies* de la línea de costa. Son los transectos, por tanto, la principal entidad geométrica generada en este trabajo, a los que se asocian los resultados estadísticos del cálculo de tasas. Dado que estos elementos son esenciales para nuevos cálculos futuros, **la digitalización y posterior edición de la línea base así como de los transectos (también editados), se puede considerar otra aportación singular de este trabajo**, al haber permitido la aplicación de

la metodología para toda una costa de las dimensiones de Andalucía y posibilitar la incorporación futura de nuevas fechas de cálculo.

Tras la aplicación de esta metodología a los *proxies* de todas la fechas utilizadas, podría afirmarse que los resultados del **cálculo de las tasas de erosión para la totalidad de las playas expuestas de Andalucía** y para **todos los períodos considerados** constituyen el principal **resultado científico de la misma, el cual no tiene precedentes y que viene, por otra parte, a solventar las dificultades previas para la comparación** (diferentes períodos, diferentes *proxies*, diferentes fotointérpretes, etc.) de los compartimentados estudios realizados en la región con anterioridad. De las diferentes posibilidades de explotación científica del enorme volumen de resultados de tasas obtenidos para toda Andalucía (diferentes períodos de estudio, 2 tipos de *proxies*...) que hacen inviable su presentación pormenorizada, se ha optado por incluir en el documento escrito de esta Tesis:

- ⇒ Una **valoración sintética de la evolución para toda la costa de Andalucía**, que enlaza con la hipótesis y los objetivos marcados, proporcionando un carácter singular: un único fotointérprete, un *proxy* (*backshore/foredune*) y diferentes períodos.
- ⇒ Una **interpretación más detallada para 2 Tramos costeros representativos**: uno en la fachada atlántica (río Guadiana-puerto de Chipiona) y otro en la mediterránea (Castell de Ferro-Cabo de Gata).

Respecto a la **valoración global para las tasas de erosión calculadas para todas las playas expuestas de Andalucía con el *proxy backshore/foredune*, acantilado o infraestructura**, se podría concluir:

En relación con la **distribución espacial de transectos/puntos positivos y negativos** (Figura 5.1) los resultados revelan las siguientes características:

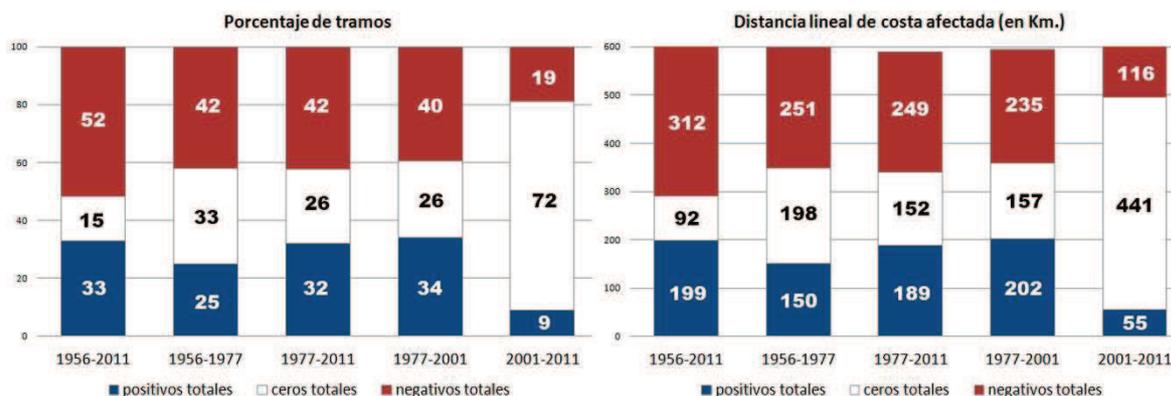


Figura 5.1. Porcentaje de tramos y distancia lineal de costa afectada por cada fenómeno para cada período.

Fuente: elaboración propia.

- ⇒ En todos los períodos hay un **predominio de los sectores erosivos** respecto a los tramos de costa que presentan tasas progresivas. Este predominio de los sectores erosivos es mayor en la fachada mediterránea que en la atlántica.
- ⇒ Se aprecia una **reducción progresiva en la longitud de tramos erosivos** dependiendo del período elegido. Por ejemplo, pasan de 312 Km. para el período global (1956-2011) a 116 Km. para el período más reciente (2001-2011) en el cual, a pesar de la reducción de la longitud afectada por erosión, se sigue casi duplicando el porcentaje y longitud de las playas afectadas por tasas positivas.
- ⇒ Se aprecia igualmente una **reducción parecida en la longitud de los tramos que presentan tasas positivas** que pasan de 199 Km. para el período global (1956-2011) a 55 Km. para el período más reciente.

En relación a los valores acumulados de las tasas expresadas como **superficies erosionadas o ganadas por la oscilación de la línea de costa**, o bien en su expresión como **avance o retroceso medio** para todas las playas expuestas de Andalucía (Figura 5.2), incorporando ahora la intensidad de los procesos erosivos o acumulativos que antes solo se habían valorado en su distribución espacial, se podría concluir:

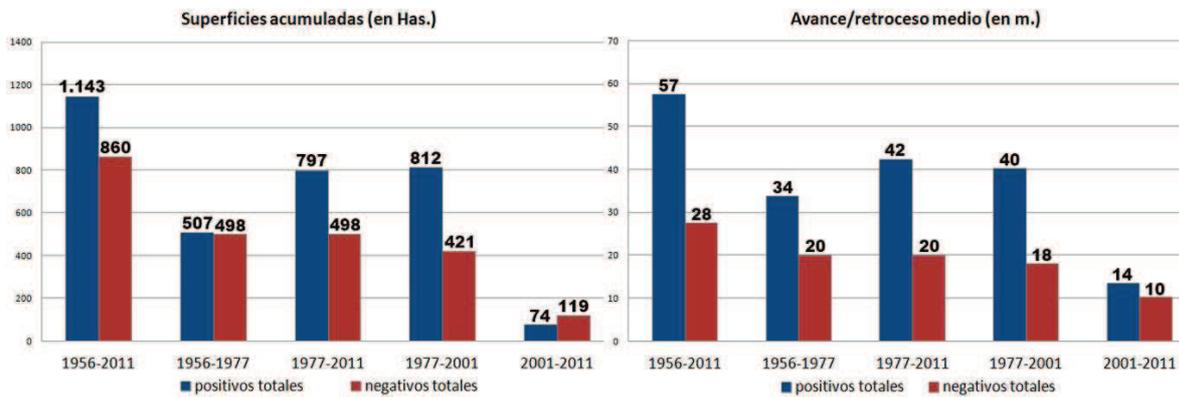


Figura 5.2. Superficie acumulada y oscilación media de la línea de costa para cada período.
Fuente: elaboración propia.

- ⇒ La primera conclusión a la vista de los datos es que, al contrario que ocurría con la distribución espacial, si se observa la intensidad acumulada de la oscilación de la línea de costa (positiva o negativa), la superficie total afectada **es mayor, en su conjunto, para los sectores con tasas positivas**, así como el correspondiente **avance medio de la línea de costa**.
- ⇒ También se observa un **progresiva reducción** en los todos los **períodos tanto de la superficie ganada como en la erosionada**, consecuente con la reducción en la distribución espacial antes comentada.
- ⇒ Como ya se puso de manifiesto en el capítulo de resultados, esta paradoja, una mayor distribución espacial de la erosión (número de transectos) respecto a la acumulación, pero una mayor superficie de terrenos afectados por ésta, se explica fácilmente por el **tipo de proxy elegido** y por la simplificación del cálculo de tasas a un **proceso bidimensional**, cuando en realidad es un proceso de carácter volumétrico. Como se puso de manifiesto en el Capítulo 2, la erosión de playas es un proceso tridimensional que implica una pérdida de volumen de sedimentos, uno de cuyos resultados morfológicos es el retroceso de la línea de costa. Por ello, las superficies afectadas perdidas por la erosión generalmente están asociadas a dunas costeras o unidades fisiográficas sedimentarias (deltas, planicies litorales, terrazas marinas, acantilados de rocas deleznable....) que siempre tienen una magnitud altimétrica superior a las formaciones que generan los espacios con tasas positivas (playas progradantes, flechas litorales, etc.). Por lo tanto, en este contexto, son coherentes los resultados, aunque deben interpretarse con precaución para no afirmar ideas no adecuadamente contextualizadas.

Para finalizar las conclusiones obtenidas respecto a las tasas en toda Andalucía, la Figura 5.3 recoge los resultados antes comentados incluyendo **el porcentaje de transectos que se encuentran dentro del margen del error del método de digitalización e interpretación** (ver apartado 3.2.3). De igual forma, se incluye el porcentaje de los mismos **afectados por la presencia de infraestructuras u otros elementos antrópicos** y que, dado el *proxy* utilizado, podría inducir a conclusiones descontextualizadas al proporcionar tasas (positivas, negativas o comportamientos estables) que, en realidad, no proceden de procesos naturales (tasas “forzadas”). En este aspecto, los datos que reflejan los **efectos de las infraestructuras en el cálculo de las tasas constituyen otra aportación singular de esta Tesis** (al margen de sus efectos sobre la dinámica litoral), derivada de la integración en la base de datos espacial de la información alfanumérica del modelo de datos con los resultados del cálculo de tasas. Este hecho constituye **una de las conclusiones más importantes**, tanto desde la perspectiva metodológica (elección del *proxy*) como desde la interpretación científica de los resultados, al poder relacionar las tasas con la información temática (presencia de infraestructuras, presencia de dunas, tipologías geomorfológicas costeras, etc.). Por ello, para la correcta interpretación de la Figura 5.3, es de necesaria consideración indicar que se entiende por:

- ⇒ Tasas positivas “forzadas”: se entienden por tal aquellas donde es la infraestructura u acción antrópica la que ha hecho avanzar la línea de costa. Es bastante común en paseos marítimos, muros de defensa o escolleras cuando parte de las mismas han ocupado antiguas playas en su proceso de construcción o remodelación.
- ⇒ Tasas negativas “limitadas”: asociadas a transectos donde en la fecha más reciente del período existe una infraestructura que impide la movilidad de la línea hacia el interior, que hubiera proporcionado tasas más elevadas que las cuantificadas por el método *DSAS*.
- ⇒ Valores “ceros forzados”: quizás sea el valor más interesante, al describir el número de transectos que en cada período presentan una situación estable (no oscilación del *proxy*) debido a la presencia de infraestructuras o elementos antrópicos.

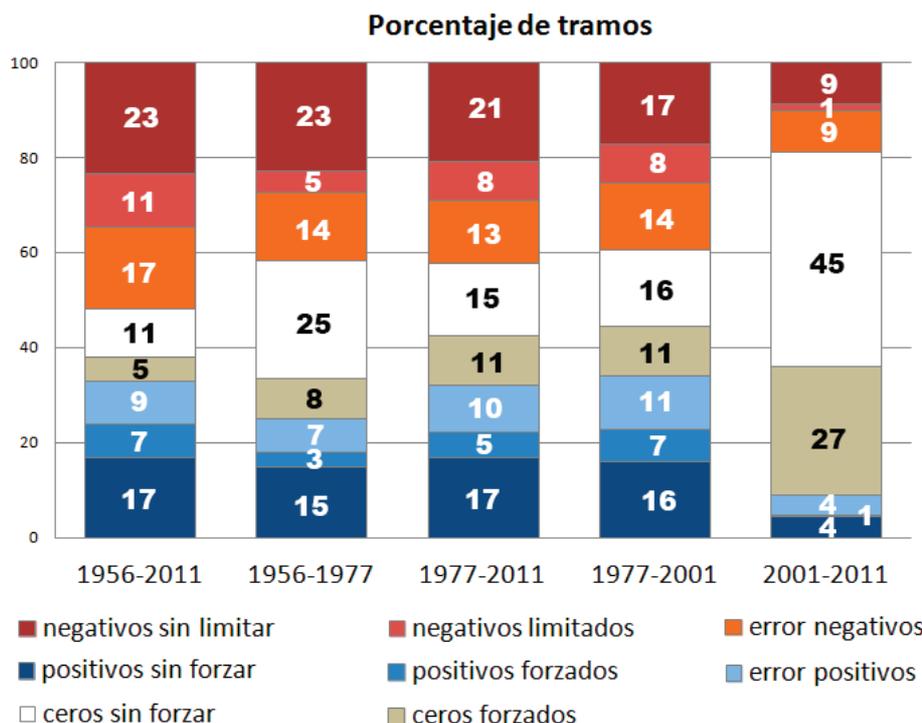


Figura 5.3. Porcentaje de tramos según su comportamiento evolutivo con influencia de errores y presencia de infraestructuras.
Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la Figura 5.3, el porcentaje de sectores estables es de un 26 % para el período de referencia (1977-2011) y desciende al 16 % si consideramos el período global (1956-2011). Más significativa es la valoración con períodos temporales consecutivos, los cuales proporcionan 2 hechos relevantes:

- ⇒ Una clara disminución de los sectores estables si consideramos el primer período con una menos incidencia antrópica (un 33% para 1956-1977) en relación al período (1977-2001) donde sólo un 27 % de los transectos son definidos como estables.
- ⇒ Un extraño aumento del número de transectos estables (72%) durante el período más reciente: 2001-2011.

Si sólo se hubiese analizado este **último período** (2001-2011) se podría deducir que la mayor parte de las playas de Andalucía presentan un **comportamiento estable**, aunque los transectos que presentan un comportamiento erosivo siguen duplicando a los que presentan tasas positivas.

El *proxy* utilizado (*backshore/foredune*, acantilados o infraestructuras antrópicas) y el incremento de presión antrópica sobre la costa producida durante el último período (*boom* urbanístico hasta la crisis en 2009), junto a la perspectiva histórica del período

anterior (1977-2001), permiten aclarar, en parte, este elevado incremento de los transectos estables, ya que una parte importante son “**forzados**”(un 27% del total) por la presencia de infraestructuras antrópicas (paseo marítimos, escolleras, muros de defensa, urbanización sobre la playa, etc.). Para constatar este hecho se han seleccionado entre los **transectos estables** aquellos que, en la Ortofotografía de 2011, la migración estaba impedida por estas infraestructuras u otros elementos antrópicos, arrojando casi un 40% de estos sectores estables, representando casi 180 Km. de línea de costa. Se ha constatado para estos transectos en el período anterior (1977-2001) un comportamiento positivo o negativo, arrojando las siguientes cifras: 59 Km. habían desarrollado un comportamiento regresivo (ahora impedido por la infraestructuras en 2011) y 54 Km. un comportamiento positivo en los que, obviamente, el avance se ha paralizado en el período actual por un claro déficit sedimentario.

Como conclusión final, por lo tanto, se constata que **en Andalucía siguen predominando los transectos erosivos** (en todos los períodos analizados), revelando un déficit crónico de toda costa debido a la alta regulación de sus principales aportes (cuencas de los ríos) y a las importantes alteraciones antrópicas a la dinámica longitudinal (diques, etc.) y transversal (ocupación de dunas y playas). Este comportamiento alterna con una alta intensidad de los procesos de acumulación en algunos sectores puntuales por la propia dinámica natural (tramos finales de flechas litorales –por ejemplo, El Rompido-) y, sobre todo, por la importante alteración a la dinámica longitudinal (puertos, espigones, etc.). Otra importante conclusión es el **importante efecto de las obras de infraestructura** en el último período analizado. Este efecto impide la migración natural de la costa, proporcionando una **errónea sensación del predominio de sectores estables**, cuando de los resultados antes citados se podría deducir que serán estos sectores (especialmente los que habían tenido históricamente un comportamiento regresivo) los que se verían más afectados en el futuro y exigirían una continua inversión para su mantenimiento (paseos marítimos, escolleras, ocupación urbana sobre playas y dunas costeras...), máxime si se hubieran integrado en el análisis (no considerados en el contexto de esta Tesis) los potenciales incrementos de la erosión por el ya científicamente constatado incremento del nivel medio del mar por el calentamiento terrestre (IPCC, 2014).

En relación a la **interpretación más detallada para 2 Tramos representativos (río Guadiana-puerto de Chipiona y Castell de Ferro-Cabo de Gata)** se podrían afirmar, a modo de conclusión, la adecuada elección de los Tramos (dada la imposibilidad

de una interpretación pormenorizada de todas la playas) por poseer características representativas de cada vertiente, así como complementarias en relación a los resultados de las tasas obtenidas y sus causas. De los resultados de las tasas se puede concluir lo siguiente:

⇒ Como puede apreciarse en la Figura 5.4, ambos Tramos presentan comportamientos diferentes en relación a la distribución espacial de los transectos erosivos o con un comportamiento progradante. En el **Tramo 1**, a diferencia de lo comentado para el total de las playas andaluzas, predominan los transectos con comportamiento progradante, tanto en el período de referencia 1977-2011 (57%) como en el período histórico precedente 1956-1977 (41%). En el **Tramo 5**, en cambio, predominan los transectos con comportamiento erosivo, alcanzando un 61% para el período de referencia y un 54% en el período histórico precedente. Ambos casos representan los 2 Tramos con el comportamiento más extremo de la región.

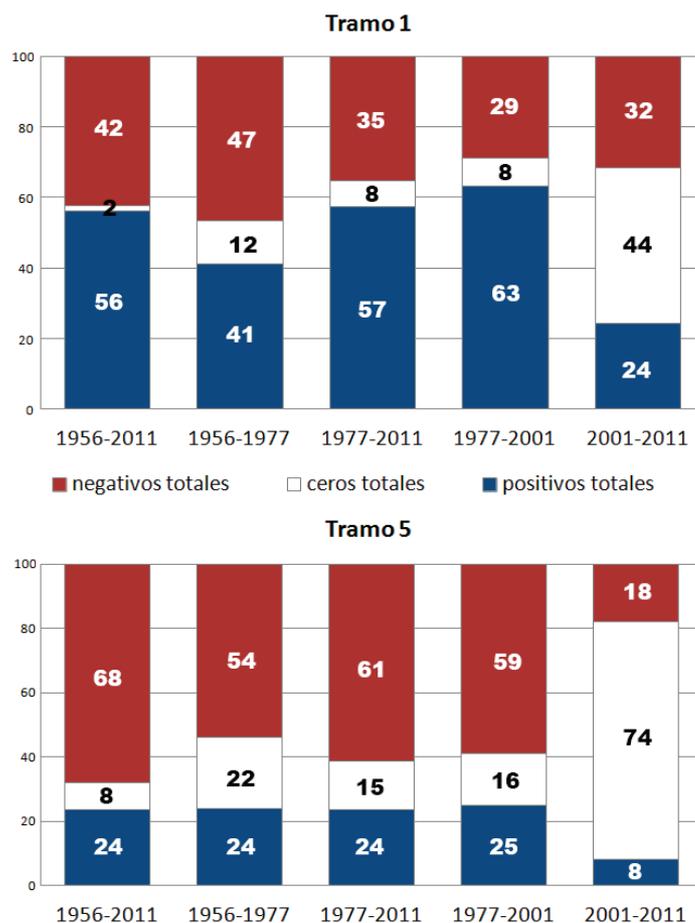


Figura 5.4. Porcentaje de transectos afectados por cada fenómeno para los Tramos 1 y 5. Fuente: elaboración propia.

- ⇒ Por otra parte, en los dos Tramos se produce una significativa reducción de los sectores con comportamiento positivo y negativo en el período más reciente, en ambos casos como consecuencia del incremento de los sectores con comportamiento estable, que alcanzan el 44% en el **Tramo 1** y que se eleva al 74% en el **Tramo 5**. La explicación de estos resultados nos revela, por otra parte, el diferente impacto de las infraestructuras e intervenciones antrópicas en función de las características del balance sedimentario y características dinámicas de ambos sectores.
- ⇒ En el **Tramo 1**, como se explica en el Capítulo 4 correspondiente a los resultados, la dinámica litoral está comandada por una potente deriva litoral que hace progradar las diferentes formaciones arenosas (islas barreras evolucionadas, flechas y contraflechas litorales) asociadas a los estuarios que vierten a este sector costero, de los cuales el Guadiana es la principal fuente de aportes sedimentarios. Como puede observarse en la Figura 5.5, durante el período histórico 1956-1977 se observa un predominio de los sectores progresivos (Isla Canela, El Rompido, Punta Umbría y Punta de Malandar), con los sectores regresivos concentrados en los sectores del acantilado del Asperillo y playas próximas al puerto de Chipiona. En el período de referencia (1977-2011) se constata la gran influencia que han tenido en este Tramo las puntuales pero muy importantes infraestructuras costeras, significando una notable **alteración a la dinámica longitudinal** (diques de encauzamiento de los ríos Guadiana y Carreras, así como el dique Juan Carlos I). El resultado es un incremento espectacular de las tasas de progradación que se asocian a los sectores occidentales de dichas infraestructuras. Sin embargo, si se observa las tasas del último período 2001-2011, **ha cambiado la tendencia** del Tramo, predominando las tasas negativas (déficit de aportes) y ralentizándose las tasas de progradación en los sectores históricamente acumulativos (El Rompido reduce sus tasas de progradación a la mitad).

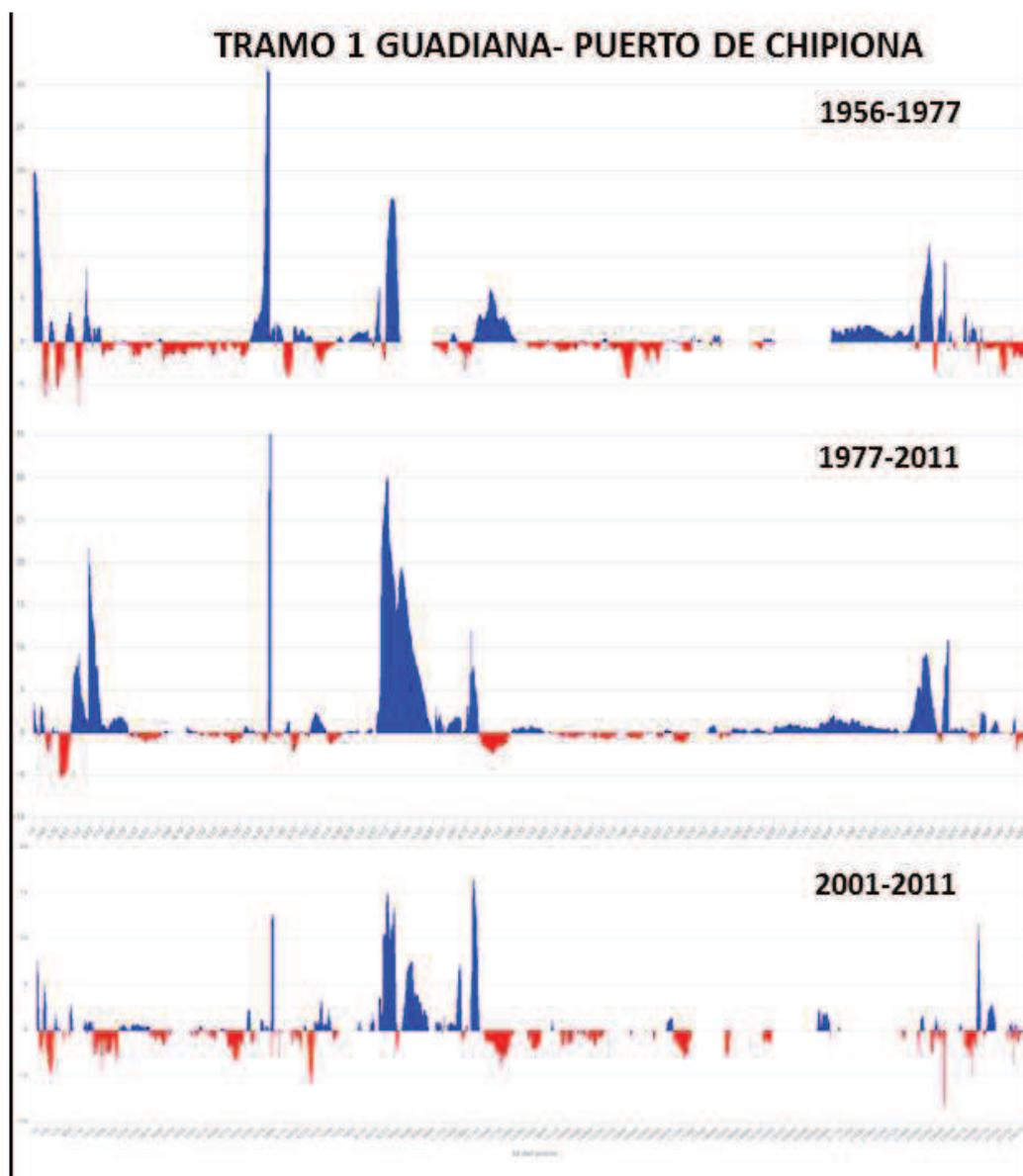


Figura 5.5. Tasas de erosión del Tramo 1 para los períodos de estudio 1977-2011, 1956-1977 y 2001-2011.

Fuente: elaboración propia.

⇒ En el **Tramo 5**, los resultados de las tasas revelan un comportamiento muy distinto, a la vez que complementario. Por una parte, como puede observarse en la Figura 5.6, hay un total predominio de las tasas negativas. En el período histórico 1956-1977, este predominio es evidente salvo en el sector más occidental (Castell de Ferro-Puerto de Adra), donde el efecto del comentado evento de 1974 (episodio extremo de precipitaciones) hizo progradar los principales deltas asociados a cuencas no reguladas (por ejemplo, Albuñol). En el período de referencia (1977-2011), el predominio de las tasas erosivas es casi completo, si exceptuamos los sectores progradantes asociados a las

formaciones arenosas del Campo de Dalías y algunos sectores por la presencia de infraestructuras que impiden el tránsito longitudinal. En el período más reciente se evidencia con claridad el **significativo aumento de los transectos con comportamiento estable**, si bien, como se comenta para toda Andalucía, en su mayor parte están ligados a una estabilidad “forzada” por la presencia de infraestructuras (escolleras de defensa en todos los deltas, paseos marítimos, etc.).

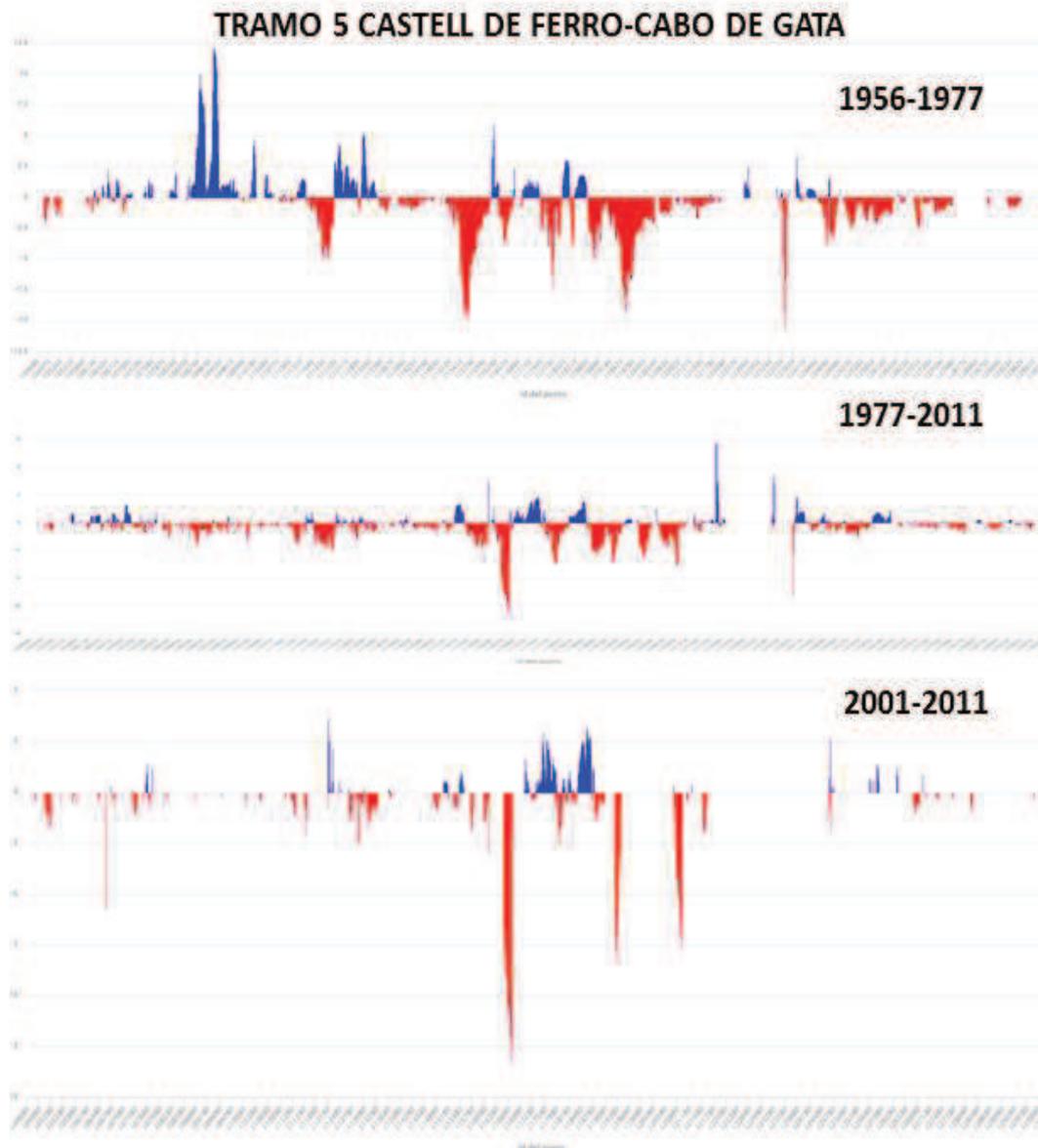


Figura 5.6. Tasas de erosión del Tramo 5 para los períodos de estudio 1977-2011, 1956-1977 y 2001-2011.

Fuente: elaboración propia.

5.1.4.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 4

Explotación adicional de las tasas calculadas, derivada de su tratamiento conjunto con la información temática del modelo de datos de la línea de costa, para la generación de indicadores temáticos, especialmente los referidos a su efecto en la playa como recurso turístico.

En el Capítulo 4, correspondiente a los resultados, ya se expusieron algunos ejemplos de la explotación conjunta de la información sobre tasas de erosión (derivada de la geometría) en combinación con el conjunto de atributos temáticos (tipología de costa, infraestructuras, indicadores de playa útil de uso turístico, etc.) que recogía el modelo de datos final. Una conclusión de esta Tesis es **el interés de asociar** (en el contexto de una base de datos espacial **PostgreSQL/PostGIS**) **a las líneas fotointerpretadas y digitalizadas a escala de detalle** (la labor más costosa en términos de tiempo), **información temática complementaria que puede ser explotada tanto desde la perspectiva científica como aplicada**. Como prueba de ello se han presentado 3 conjuntos de resultados:

- ⇒ La explotación de la geometría de los dos *proxies* fotointerpretados para generar un conjunto de **capas poligonales** que recogen la superficie de playa útil (turística), de gran interés aplicado para los cálculos de capacidad de carga turística.
- ⇒ Haciendo uso del modelo de línea de costa y su relación con el resto de tablas temáticas se pueden extraer un **conjunto de estadísticos, en base a diferentes unidades administrativas** (municipales, espacios naturales, playas, etc.) que se pueden expresar como porcentajes tanto en relación a la **línea corta (frente de playa)** como a la **línea larga (fisiográfica)**.
- ⇒ La generación de índices e indicadores complejos para evaluar la **sensibilidad de las playas como recurso turístico a los procesos erosivos**, integrando las tasas de erosión y otras variables como su anchura útil o la presencia dunas costeras.

En relación a estos resultados, se puede concluir que la posibilidad de generar multitud de indicadores temáticos (a diferentes escalas espaciales, ámbitos administrativos y rangos temporales), derivada de la propuesta metodológica que integra los resultados de las tasas con un elevado conjunto de información temática en una base de datos espacial (PostgreSQL/PostGIS), le proporciona a la Tesis un **evidente carácter**

innovador y aplicado (interés para estadísticas públicas, gestión ambiental y territorial, planificación turística...), al no haber encontrado en la bibliografía de referencia experiencias similares para una costa de la amplitud de la andaluza.

5.1.5.- EN RELACIÓN AL OBJETIVO 5

Tratamiento semiológico y cartográfico de los resultados de los cálculos, análisis y generación de indicadores para la generación de servicios OGC que garanticen su difusión web en una versión específica del geovisor web desarrollado por el Grupo de Investigación.

La experiencia previa del Grupo de Investigación en el desarrollo de geovisores web y diversos trabajos previos sobre la zona costera a escala de detalle había evidenciado la necesidad de utilizar otros medios diferentes a los tradicionales para la difusión de los resultados (textos y cartografía en papel o su versión digital en ficheros *pdf*), ya que debido a las escalas de detalle (1:2.500) utilizadas para toda la costa de Andalucía, conllevaría la realización y descripción de un número inabordable de mapas en anexos. Si a ello se le une, en el caso de esta Tesis, la utilización de diferentes *proxies* y períodos temporales, se multiplicarían las necesidades de acceso e imposibilitarían la visualización de conjunto. Por todo ello, en el contexto del Grupo de Investigación ya era evidente que el sustituto natural, en estos casos, de los anexos cartográficos es la **utilización de geovisores web** mediante uso de **servicios interoperables OGC** que, además, garantizan el acceso público y gratuito a la información.

Por todo ello se puede afirmar, como conclusión, que el objetivo perseguido en esta Tesis ha sido conseguido con la incorporación a la misma de **2 formas de difusión**, con claras ventajas complementarias:

- ⇒ **Servidor de mapas (geoserver)** para la generación de los **servicios interoperables OGC (WMS, WMTS y WFS)**: estos servicios son, además, los estándares definidos por la Directiva *INSPIRE* y permiten usos complementarios y gratuitos a cualquier usuario externo a través de diferentes clientes, que requieren un mínimo de formación para posibilitar el acceso a los mismos:

- *Web Map Service (WMS)*: es el equivalente al “mapa” y, por lo tanto, exige un adecuado tratamiento de la semiología. Además permite su visualización multiescalar, esencial en esta Tesis, y el acceso a la información temática asociada (*GetFeatureInfo*).
 - *Web Map Tiled Service (WMTS)*: es una modificación del *WMS* que, al almacenar en caché los múltiples y multiescales “*tiles*” o “cuadrículas” previamente generados, acelera el acceso y velocidad de respuesta, suponiendo una característica esencial en internet.
 - *Web Feature Service (WFS)*: en este caso, se accede a los datos vectoriales (puntos de representación de datos) en su totalidad (geometría y atributos temáticos), permitiendo un tratamiento analítico posterior por parte del usuario.
- ⇒ **Geovisor web**: esta es la vía de acceso más comúnmente utilizada en la actualidad en el contexto de la información geográfica por internet, ya que permite el acceso directo a la información (generalmente a través de servicios *OGC*) sin necesidad de formación alguna por parte del usuario al ser facilitada por las diferentes funcionalidades del geovisor (catálogo predefinido, pestañas de ayuda, etc.). En este sentido, en la Tesis se ha optado por un geovisor que cumple 2 funciones:
- **Funcionalidades de un visor generalista (*Leaflet*)**: se ha utilizado el visor desarrollado por el Grupo de Investigación para otros proyectos de investigación, personalizándolo para garantizar el fácil acceso de cualquier usuario a todos los datos producido y calculados en la presente Tesis. En este sentido, se ha hecho un esfuerzo en el tratamiento de la semiología para facilitar la asimilación del elevado conjunto de datos y su comparación espacial (ventanas sincronizadas) y temporal (puntos en diferentes *buffers*). El resto de utilidades del visor (catálogos, proyectos, descargas de *pdf*, etc.) garantizan el acceso y difusión de los datos, cumpliendo con este objetivo específico del presente trabajo.
 - **Funcionalidades de una herramienta para usuarios expertos (*Openlayer*)**: desde el visor generalista se puede acceder a una nueva herramienta basada en un visor desarrollado con las librerías *Openlayer* que recoge las funcionalidades que, en base a criterios puramente objetivos, necesitaría un usuario experto que no sólo demandase información más detallada o agregada espacialmente, sino que

necesitase otras vías de exploración de los datos (gráficos, cálculo de indicadores especializados, etc.). Por ello, en esta herramienta se ha incluido:

- Generación de **WMS** o **WMTS filtrados**: esta herramienta permite la visualización de los resultados filtrados por cualquier atributo temático (tasas de las playas con presencia de dunas o exclusivamente de las playas asociadas a infraestructuras, por ejemplo).
- **Servicios WFS**: como forma de exploración de los datos complementaria a la geovisualización, la utilización de estos servicios permite acceder a los datos originales, también filtrados a demanda, y con ellos generar:
 - **Diferentes tipos de gráficos** para explorar los datos (de barras, de tendencias, etc.).
 - **Indicadores en tiempo real** para ámbitos espaciales definidos por el propio usuario (porcentajes de tasas negativas o retrocesos medios para un sector de playa o un ámbito espacial específico).

En este objetivo, aunque en el Capítulo 2 se mostraron experiencias del uso de geovisores web a nivel internacional y nacional para la difusión de tasas de erosión, se observa que el desarrollado en esta Tesis tiene diferentes funcionalidades innovadoras que no tienen precedentes más que en el contexto de los desarrollados previamente en el Grupo de Investigación. Al margen de las funcionalidades comentadas, el **visor generalista** incorpora, de forma innovadora para geovisores de erosión, todos los niveles de interacción entre cliente y servidor, pudiéndose convertir en el futuro en un magnífico instrumento para trabajos o proyectos de investigación colaborativa. La incorporación de la **herramienta de exploración de los datos para expertos** ha constituido, igualmente, un avance significativo y novedoso al permitir explorar los datos de forma directa (elaboración de gráficos o cálculo de indicadores), haciendo uso de todo el potencial que tiene la incorporación en la base de datos espacial de los resultados de los cálculos de tasas e indicadores junto al resto de información temática.

5.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

De los resultados, experiencia y conclusiones derivadas del desarrollo de esta Tesis Doctoral se han ido concretando **futuras líneas de investigación** que, tanto el autor de ésta como el Grupo de Investigación en su conjunto, estarían interesados en desarrollar en el futuro y que, en cierta medida, ya se han propuesto en algunos proyectos de investigación recientemente concedidos al mismo. Por ello, se trata de líneas de investigación en las que el autor y el Grupo de Investigación en el que se inserta estarán implicados en los años futuros. Se han estructurado en diferentes temáticas que también están relacionadas con las hipótesis y objetivos que han llevado al desarrollo de la Tesis.

En relación con **la revisión y control de calidad de los *proxies* y el cálculo de nuevas tasas**, se han identificado 3 líneas de investigación futuras:

- ⇒ La primera es de obligado cumplimiento, ya que estaba incluida en la propuesta del proyecto de investigación concedido al Grupo, en el que participa el autor como investigador contratado (*“Espacialización y difusión web a escalas de detalle de indicadores de vulnerabilidad de las playas de Andalucía como recurso turístico ante los procesos erosivos”* –Referencia CSO2014-51994-P-) que finalizará en diciembre de 2018. Se trata, dada la publicación reciente de nuevas ortofotografías, de la **incorporación de 2 fechas nuevas (2013 y 2015)** a la base de datos, para la fotointerpretación y digitalización de los *proxies*, así como **el cálculo de tasas de erosión para nuevos períodos**. Obviamente, con el fin de garantizar la comparabilidad de la fotointerpretación y digitalización, **estos trabajos los realizará el autor de esta Tesis**.
- ⇒ La segunda guarda relación con la posibilidad que ofrece el **visor generalista desarrollado** de incorporar interacciones bidireccionales y multidireccionales con los usuarios. Es decir, se intentará que **usuarios autorizados externos** puedan evaluar la **calidad de la digitalización y tasas online** y que sus **comentarios georreferenciados** (asociados a puntos, líneas o polígonos) puedan utilizarse como **control de calidad externo** (investigadores especialistas en erosión costera de otras universidades con experiencia en la costa de Andalucía), ampliando las posibilidades de realizar estos trabajos en un entorno colaborativo más amplio.
- ⇒ La tercera está relacionada con la calidad de la ortofotos históricas, especialmente la correspondiente al Vuelo Americano de **1956**, que en este trabajo de investigación ha obligado a la georreferenciación manual de algunos

fotogramas mediante puntos de control. Aunque se trata de ortofotografías generadas por restitución digital (tras el escaneo de los fotogramas), e independientemente de la calidad radiométrica, aún suelen tener problemas geométricos en algunos sectores debido a la calidad de MDT utilizado y a la dificultad de encontrar puntos de apoyo en esas fechas pasadas para los procesos de triangulación y orientación externa. Por ello, sería más interesante en el futuro aplicar el **método de corrección geométrica diferencial** presentado en el Congreso Nacional de Teledetección (Ojeda et al., 2015), ya que permite utilizar la digitalización sobre las ortofotografías originales (con las deficiencias geométricas del proceso de restitución) y aplicar la corrección “a posteriori” a las tasas calculadas sin interrumpir el costoso proceso de fotointerpretación y digitalización.

En relación con las **mejoras en el modelo de datos de la base de datos espacial**, se intentará completarla con **nuevas entidades y tablas** relacionadas con los principales **factores y causas explicativas** del comportamiento de las tasas de erosión en los períodos analizados, los cuales se han obviado intencionadamente en esta Tesis al estar centrada en los **aspectos metodológicos** para su cálculo, descripción, análisis estadístico y difusión web. Dichos factores y causas explicativas podrían agruparse en 2 grupos temáticos:

- ⇒ **Series temporales** de todos los registros históricos de 2 de los principales agentes que podrían explicar en parte el comportamiento de los procesos erosivos en las playas:
 - **Datos de los Mareógrafos** en la costa de Andalucía y áreas periféricas, los cuales proporcionarían el **comportamiento del nivel relativo del mar** para los períodos temporales de análisis.
 - **Datos de boyas de Oleaje**, que proporcionarían información sobre el comportamiento del principal agente en la dinámica de las playas. Igualmente se extraerían un conjunto de indicadores (altura significativa media, dirección media, número de temporales, etc.) para los períodos temporales de análisis de las tasas de erosión.
- ⇒ **Resultados de la modelización numérica** de otros 2 factores de significativa importancia en el **balance sedimentario** de los Tramos y Unidades Fisiográficas con repercusión en las tasas de erosión registradas en los mismos:

- **Modelización hidrológica de cuencas de las cuencas vertientes**, para intentar obtener una estimación de los aportes de las mismas a las playas en los períodos de cálculo.
- **Modelización numérica del oleaje** para poder propagar hacia la costa la información de oleaje medido en las boyas y, de este modo, obtener información del tránsito sedimentario (derivadas dominantes, identificación de células de transporte...), así como indicadores del propio oleaje a una escala más detallada.

En relación con la **explotación de nuevos indicadores sintéticos**, se prevé desarrollar un conjunto de nuevos indicadores e índices que se basen no en datos pasados (tasas, anchura de playa, amplitud de dunas costeras, etc.), sino en las expectativas de la evolución de las **tasas de erosión en el futuro** y evaluar su impacto sobre determinados recursos turísticos, actividades económicas y variables ambientales. Entre ellas, se pueden señalar:

- ⇒ Indicadores de sensibilidad de la playa útil de uso turístico a los procesos erosivos futuros.
- ⇒ Indicadores de sensibilidad de zonas urbanizadas (extraídas de Catastro) a los procesos erosivos futuros.
- ⇒ Indicadores de los espacios costeros de mayor biodiversidad a los procesos erosivos futuros.

En relación con la **difusión web**, los resultados y conclusiones de esta Tesis, sobre todo las funcionalidades potenciales del **visor generalista** y la **herramienta de exploración de datos para expertos**, han revelado diferentes líneas futuras de investigación que, aunque es intención de aplicarlas temáticamente a los procesos erosivos, constituyen líneas de investigación transversales dentro del Grupo de Investigación:

- ⇒ En primer lugar, aunque en esta Tesis se han abordado y realizado propuestas para el **tratamiento semiológico de los datos de erosión aprovechando las capacidades de visualización multiescalar de los visores**, es necesario seguir explorando nuevos **procedimientos metodológicos para mejorar los procesos de generalización** que conlleva la representación de datos originales a gran escala de detalle, cuando se requiere su geovisualización a

escalas de menor detalle (procesos de simplificación geométrica, utilización de clúster gráficos, etc.).

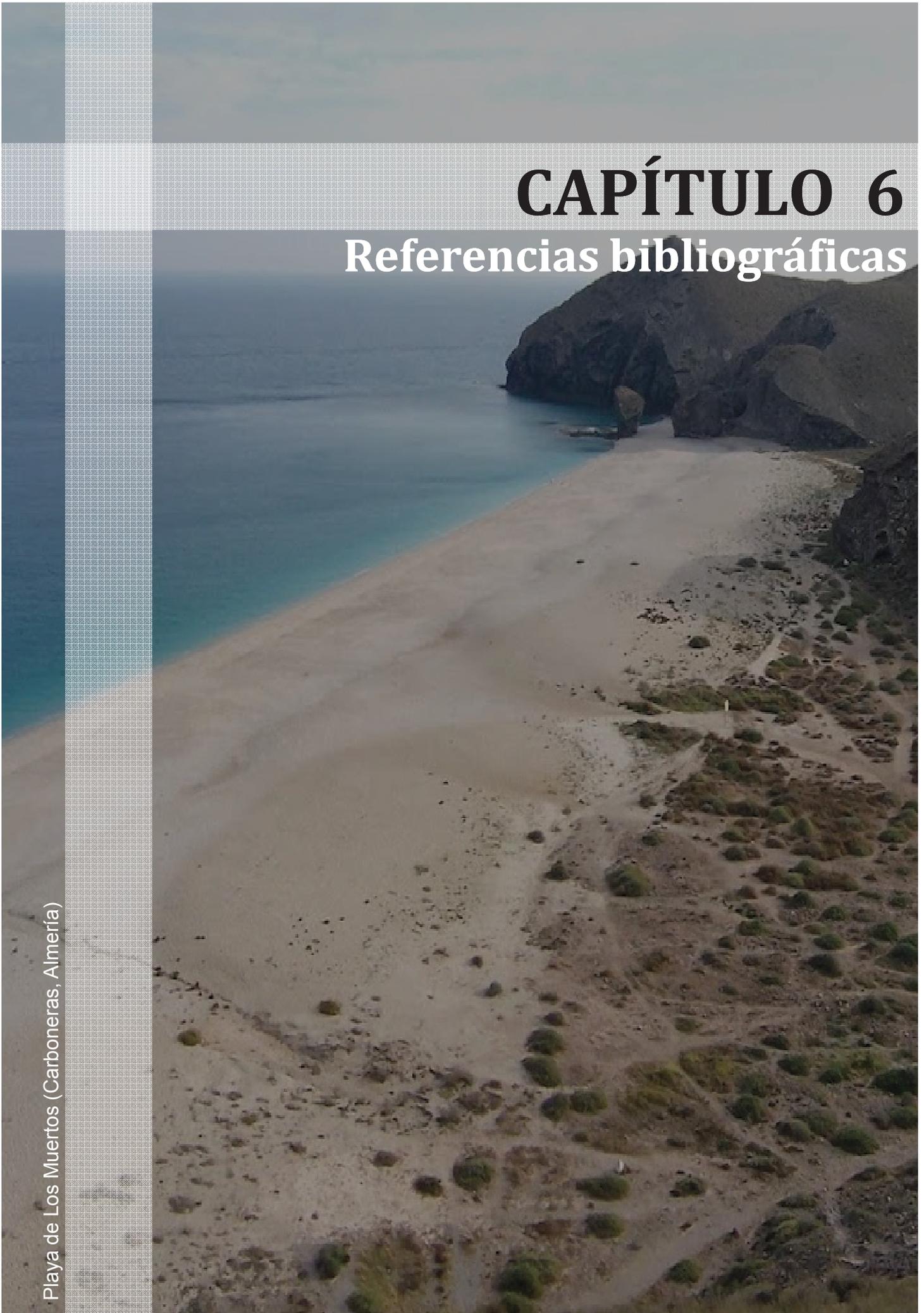
⇒ En relación a **futuras funcionalidades del geovisor web** desarrollado, destacan dos líneas de investigación futuras y complementarias:

- **Mejorar las capacidades de trabajo de investigación colaborativo en el geovisor generalista.** Al margen de las funcionalidades existentes en el geovisor (interacción unidireccional, bidireccional y multidireccional), sería interesante desarrollar herramientas que mejoren los procesos de digitalización y exportación (muy simples en la versión actual y de gran utilidad para usuarios externos) o que permitan la generación de estadísticas en tiempo real de las informaciones enviadas por los usuarios externos desde el geovisor.
- Los satisfactorios resultados de la **herramienta de exploración de datos para usuarios expertos** abren otra línea de investigación centrada en la **incorporación de nuevos elementos** que permitan la exploración y explotación directa de los datos a los que se accede en esta herramienta: incorporación de nuevos tipos de gráficos, generación de estadísticos básicos en una serie temporal con posibilidad de elección del tramo espacial de análisis, gráficos de comparación entre períodos de temporales o entre Tramos o Unidades Fisiográficas, etc.

CAPÍTULO 6

Referencias bibliográficas

Playa de Los Muertos (Carboneras, Almería)



CAPÍTULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PUBLICACIONES

- Aarninkhof, S. G. J., Caljouw, M. y Stive, M. J. F. (2001). Video-based, quantitative assessment of intertidal beach variability. In *Coastal Engineering 2000* (pp. 3291–3304). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. [http://doi.org/10.1061/40549\(276\)256](http://doi.org/10.1061/40549(276)256)
- Aarninkhof, S. G. J., Turner, I. L., Dronkers, T. D. T., Caljouw, M. y Nipius, L. (2003). A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engineering*, 49(4), 275–289. [http://doi.org/10.1016/S0378-3839\(03\)00064-4](http://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00064-4)
- Albuquerque, M., Espinoza, J., Teixeira, P., de Oliveira, A., Corrêa, I. y Calliari, L. (2013). Erosion or coastal variability: an evaluation of the DSAS and the Change Polygon Methods for the determination of erosive processes on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 165, 1710–1714. <http://doi.org/10.2112/SI65-289.1>
- Alexander, C. M. O., Bowden, R., Fogel, M. L., Howard, K. T., Herd, C. D. K. y Nittler, L. R. (2012). The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. *Science*, 337(6095), 721–723. <http://doi.org/10.1126/science.1223474>
- Almonacid, J., Sánchez, E., Pardo, J. E., Balaguer, A. A. y Palomar, J. (2016). Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, 372, 79–88. <http://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.015>
- Alonso, C., Gracia, F. J. y Benavente, J. (2009). Evolución histórica de la línea de costa en el sector meridional de la Bahía de Cádiz. *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria Y Arqueología Social*, 11, 13–37.
- Alonso, I., Cabrera, L., Jiménez, J. A., Valdemoro, H. y Sánchez, I. (2007). Aplicación de la fotogrametría a estudios de erosión costera. En *XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección* (p. 6). Mar del Plata.
- Álvarez, J. I. (2016). *Geovisualización de grandes volúmenes de datos ambientales. Diseño e implementación de un sistema para el acceso y la difusión de datos globales*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla. pp. 221
- Álvarez, J. I., Camarillo, J. M., Limones, N. y Pita, M. F. (2014). Globalclimatemonitor.org: una herramienta de acceso a datos climáticos globales. *Geofocus*, 14, 1–6.
- Anders, F. J. y Byrnes, M. R. (1991). Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore & Beach*, 59(1), 17–26.
- Anfuso, G. (2001). Morfología y dinámica sedimentaria del litoral gaditano entre Chipiona y Rota. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Puerto Real. 336 pp.
- Anfuso, G. y Del Río, L. (2003). Cuantificación de las variaciones volumétricas y evolución del litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz) durante el período 1996-1998. *Cuaternario Y Geomorfología*, 17(3–4), 17–27.
- Anfuso, G., Gracia, F. J., Martínez, J. A., Del Río, L., Andrés, J., Sánchez, F. y López, F. (1999). Modelización del comportamiento morfodinámico de las playas mediante el estudio de la profundidad de removilización. *Estudios Geológicos*, 55, 113–125.

- Appeaning, K. (2013). Shoreline morphological changes and the human factor. Case study of Accra Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 17(1), 85–91. <http://doi.org/10.1007/s11852-012-0220-5>
- Appeaning, K., Jayson, P. N. y Kufogbe, K. S. (2012). Quantitative analysis of shoreline change using Medium Resolution Satellite Imagery in Keta, Ghana. *Marine Science*, 1(1), 1–9. <http://doi.org/10.5923/j.ms.20110101.01>
- Arias, P., Rodríguez, J. R. y Fernández, I. (1999). Utilización de GPS RTK en entornos costeros: aplicación a la playa de Samil (Vigo-Pontevedra). *Mapping*, 53, 36–38.
- Arteaga, O., Hoffman, G., Schubart, H. y Schulz, H. D. (1989). Investigaciones geológicas y arqueológicas sobre los cambios de la línea costera en el litoral de la Andalucía mediterránea. *Anuario Arqueológico de Andalucía*, 3, 117–122.
- Ávila, G. E., Santa Rosa, M. A., Anfuso, G., Benavente, J., Guardado, R., González, O. y Velázquez, E. K. (2009). Sediment variations and littoral transport at La Victoria Beach, Cádiz, Spain. *Ciencias Marinas*, 35(3), 259–269.
- Balica, S. F., Wright, N. G. y van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64(1), 73–105. <http://doi.org/10.1007/s11069-012-0234-1>
- Ballesta, M., Morales, J. A. y Acosta, E. A. (1998). Efecto erosivo de los temporales del invierno 1995-1996 sobre la Playa de Mazagón (Huelva, SO España): influencia de las construcciones costeras. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 11(3–4), 285–296.
- Bárceñas, P., Fernández, L. M., Lobo, F. J., Vázquez, J. T., López, N. y Macías, J. (2016). Análisis de las morfologías de pequeña escala en los deltas sumergidos del sureste de la Península Ibérica. En *XIV Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 459–466). Málaga.
- Bárceñas, P., Fernández, L. M., Macías, J., Lobo, F. J. y Díaz, V. (2009). Estudio morfométrico comparativo entre las ondulaciones de los prodeltas de los ríos de Andalucía oriental. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22 (1-2), 43–56.
- Baron, H. M., Ruggiero, P., Wood, N. J., Harris, E. L., Allan, J. C., Komar, P. D. y Corcoran, P. (2014). Incorporating climate change and morphological uncertainty into coastal change hazard assessments. *Natural Hazards*, 75(3), 2081–2102. <http://doi.org/10.1007/s11069-014-1417-8>
- Barragán, D. y Castro, J. L. (2009). Investigaciones geoarqueológicas en Algeciras. La paleoensenada del Río de la Miel. *Caetaria*, 6–7, 13–32.
- Belmonte, F., Romero, A. y Ruzi, J. D. (2013). Retroceso de la línea de costa en playas del sur de de la Región de Murcia. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía Y Ciencias Sociales*, 17(443), 1–28.
- Benabent, M. (1998). La evolución del sistema de asentamientos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.*, 26, 93–107.
Extraído de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1318621.pdf>

- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C. y Muñoz, J. J. (2001). Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 14(3-4), 227-236.
Extraído de <http://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/15916>
- Bethencourt, M., Gracia, F. J., Del Río, L. y Benavente, J. (2011). Los restos de naufragios históricos como indicadores de paleolíneas de costa. El caso del Fougueux (Bahía de Cádiz). En I. Montoya, I. Rodríguez, & M. J. Sánchez (Eds.), *Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 47-50). Tarragona.
- Bijker, E. W. (1969). Littoral Drift as Function of Waves and Current. In *Coastal Engineering 1968* (pp. 415-435). New York, NY: American Society of Civil Engineers. <http://doi.org/10.1061/9780872620131.026>
- Bird, E. (1996). *Beach management* (1ª ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. 281 pp.
- Bird, E. y Lewis, N. (2015). *Beach renourishment*. Cham: Springer International Publishing. 137 pp.
- Blanco, R., Costa, M., Rey, J. M. y Vilaseco, X. I. (2015). Erosión costera en yacimientos arqueológicos: Guidorio Areoso, Ría de Arousa, Galicia. En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 1-4). Marbella.
- Boak, E. H. y Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688-703. <http://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Borja, F. y Fernández, M. (2006). *Doñana y el Cambio Climático*. WWF Adena. 63 pp.
- Borrego, J., Morales, J. A. y Gil, N. (2000). Evolucion sedimentaria reciente de la desembocadura de la Ría de Huelva (suroeste de España). *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 13(3-4), 405-416.
- Boruff, B. J., Emrich, C. y Cutter, S. L. (2005). Erosion Hazard Vulnerability of US coastal counties. *Journal of Coastal Research*, 215, 932-942. <http://doi.org/10.2112/04-0172.1>
- Bosque, J. (1992). *Sistemas de información geográfica*. Madrid: Rialp. 451 pp.
- Bowen, A. J. y Inman, D. L. (1966). *Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California*. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. 45 pp.
- Braga, F., Tosi, L., Prati, C. y Alberotanza, L. (2013). Shoreline detection: capability of COSMO-SkyMed and high-resolution multispectral images. *European Journal of Remote Sensing*, 837-853. <http://doi.org/10.5721/EuJRS20134650>
- Brocal, R., López, M. J. y Pardo, J. E. (2001). Cambios en la línea de costa mediante fotografía aérea e imágenes IRS-Pan en el litoral valenciano: sector Cullera-Tavernes (1956-1999). En *Teledetección: medio ambiente y cambio global* (pp. 225-228). Lleida.

- Brock, J. C. y Purkis, S. J. (2009). The emerging role of LiDAR remote sensing in coastal research and resource management. *Journal of Coastal Research*, 10053, 1–5. <http://doi.org/10.2112/SI53-001.1>
- Brooks, C., Butt, G. y Fargher, M. (2017). *Reflecting on What Makes Geographical Thinking Powerful. The power of geographical thinking*. http://doi.org/10.1007/978-3-319-49986-4_16
- Bru, E. y Alonso, I. (2013). Evolución temporal de playa Barca (Fuerteventura, España). Un ejemplo de playa erosiva que alcanza el equilibrio. En *VII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 135–138). Oviedo: Sociedad Geológica de España.
- Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles. Beach erosion board*. Washington: US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. 82 pp.
- Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88(1), 117–130.
- Bryant, E. (2005). *Natural hazards* (2nd ed). Cambridge: Cambridge University Press. 312 pp.
- Bugs, G., Granell, C., Fonts, O., Huerta, J. y Painho, M. (2010). An assessment of Public Participation GIS and Web 2.0 technologies in urban planning practice in Canela, Brazil. *Cities*, 27(3), 172–181. <http://doi.org/10.1016/j.cities.2009.11.008>
- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P. y Scott, T. (2016). Beach response to consecutive extreme storms using LiDAR along the SW coast of England. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 1052–1056. <http://doi.org/10.2112/SI75-211.1>
- Butler, D. (2006). Virtual globes: The web-wide world. *Nature*, 439(7078), 776–778. <http://doi.org/10.1038/439776a>
- Cabrera, L., Hernández, A. I., Viera, M., Cruz, N. y Hernández, L. (2013). Caracterización de una duna costera de zona árida: Maspalomas (Gran Canaria). En *VII Jornadas de Geomorfología Litoral* (Vol. 14, pp. 107–110). Oviedo.
- Carter, R. W. G. (1991). *Coastal environments: an introduction to the physical, ecological, and cultural systems of coastlines* (2a ed.). London ; New York: Academic Press. 617 pp.
- Catalão, J., Catita, C., Miranda, J. y Dias, J. (2002). Photogrammetric analysis of the coastal erosion in the Algarve (Portugal) / Analyse photogrammétrique de l'érosion côtière en Algarve (Portugal). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 8(2), 119–126. <http://doi.org/10.3406/morfo.2002.1133>
- Chand, P. y Acharya, P. (2010). Shoreline change and sea level rise along coast of Bhitarkanika wildlife sanctuary, Orissa: An analytical approach of remote sensing and statistical techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(3), 436–455.
- Chandramohan, P., Jena, B. K. y SanilKumar, V. (2001). Littoral drift sources and sinks along the Indian coast. *Current Science*, 81(3), 292–297. Extraído de <http://drs.nio.org/drs/handle/2264/270>

- Church, J. A. y White, N. J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise: an acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, 33(1), n/a-n/a. <http://doi.org/10.1029/2005GL024826>
Extraído de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024826/full>
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio* (1a ed.). Barcelona: Editorial Ariel. 595 pp.
- Coastal Engineering Research Center -CERC- (1984). *Shore protection manual*. Washington. United States Army Corps of Engineers. 337 pp.
- Coelho, C. y Veloso-Gomes, S. (2006). Crossshore beach profile models - application to Aveiro coast. *Journal of Coastal Research*, (39), 345–350.
Extraído de http://siaiacad09.univali.br/ics2004/arquivos/68_coelho.pdf
- Compán, D. (1982). Estructura física básica y formación de Andalucía y sus áreas marinas próximas. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada.*, 12, 127–138. Extraído de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/53147.pdf>
- Cooper, J. A. G. y Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43, 157–171. Retrieved from http://www.seaturtle.org/PDF/CooperJAG_2004_GlobalPlanetChange.pdf
- Consejería de Empleo, Empres y Comercio -CEEC- (2015). *Programa de Desarrollo Rural de Andalucía 2014-2020*. 1085 pp.
Extraído de [http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/PDR de Andalucía 2014-2020 V1_10ago15.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/PDR_de_Andalucia_2014-2020_V1_10ago15.pdf)
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio -CMAOT- (2001). *Espacios naturales protegidos del litoral andaluz*. Málaga: Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. 161 pp. Extraído de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9e9e205510e1ca/?vgnnextoid=17db7728343e5010VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=1f27dfde043f4310VgnVCM1000001325e50aRCRD>
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio -CMAOT- (2006). *Geodiversidad y patrimonio geológico de Andalucía*. 328 pp.
<http://doi.org/84-933537-8-7>
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio -CMAOT- (2009). *Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2009*. Sevilla: Junta de Andalucía. 459 pp.
Extraído de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Publicaciones_Periodicas/IMA/2009/ima_2009.pdf
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio -CMAOT- (2011). *Análisis preliminar de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía a la potencial subida del nivel del mar asociada al Cambio Climático*. Sevilla: Junta de Andalucía. 151 pp.
Extraído de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/porta_web/web/temas_ambientales/clima/actuaciones_cambio_climatico/adaptacion/vulnerabilidad_impactos_medidas/vulnerabilidad_costas.pdf

- Coyne, M. A., Fletcher, C. H. y Richmond, B. (1999). Mapping coastal erosion hazard areas in Hawaii: observations and errors. *Journal of Coastal Research*, (SI 28), 171–184. Extraído de <http://www.jstor.org/stable/25736194>
- Crous, A. y Pintó, J. (2006). Evolución de la playa de Sa Riera (Cap de Begur, Costa Brava) en los últimos 50 años. *Investigaciones Geográficas*2, 39, 119–130.
- Crowell, M. y Leatherman, S. P. (1999). *Coastal erosion: mapping and management*. Coastal Education & Research Foundation. 196 pp.
- Crowell, M., Leatherman, S. P. y Buckley, M. K. (1991). Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 839–852.
- Crowell, M., Leatherman, S. P. y Buckley, M. K. (1993). Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. *Shore & Beach*, 61(2), 13–20.
- Cuartero, A. y Felicísimo, A. M. (2003). Rectificación y ortorrectificación de imágenes de satélite: análisis comparativo y discusiones. *Geofocus*, 3, 45–57.
- Dabrio, C. J., Borja, F., Zazo, C., Boersma, J. R., Lario, J., Goy, J. L. y Polo, M. D. (1996). Dunas eólicas y facies asociadas pleistocenas y holocenas en el acantilado del Asperillo (Huelva). *Geogaceta*, 20(5), 1089–1092. Extraído de http://eprints.sim.ucm.es/10753/1/1996_8_Dunas_Aasperillo_GG.pdf
- Dabrio, C. J., Zazo, C., Goy, J. L., Sierró, F. J., Borja, F., Lario, J., González, J.A., Flores, J. A. (2000). Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression (Gulf of Cadiz, Southern Spain). *Marine Geology*, 162, 381–404.
- Darsan, J. (2014). Digital Mapping of the Coastline Evolution of Cocos Bay (Manzanilla), Trinidad. *Caribbean Journal of Science*, 48(2–3), 103–116. <http://doi.org/10.18475/cjos.v48i3.a07>
- De Andrés, J. R. y Gracia, F. J. (2002). La Franja litoral: riesgos y protección. En *Riesgos naturales* (1ª ed., pp. 1023-1058). Barcelona: Ariel Ciencia.
- De la Hera, G. (1998). Transformaciones del litoral desde mediados del siglo XX. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles.*, 26, 109–120.
- Dean, R. G. (1973). Heuristic Models of Sand Transport in the Surf Zone. *First Australian Conference on Coastal Engineering, 1973: Engineering Dynamics of the Coastal Zone.*, (1), 215–221.
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53–84. Extraído de <http://www.jstor.org/stable/4297805>
- Del Río, L. (2007). *Riesgos de erosión costera en el litoral atlántico gaditano*. Cádiz, Puerto Real. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Puerto Real. 496 pp.
- Del Río, L., Benavente, J., Gracia, F. J., Anfuso, G., Martínez, J. A., Domínguez, L., Rodríguez, A., Flores, E., Cáceres, L.M., López, F. y Rodríguez, J. (2002). The quantification of coastal processes in the South Atlantic Spanish coast: methodology and preliminary results. En *Littoral* (pp. 22–26). Oporto.

- Del Río, L. y Gracia, F. J. (2013). Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes. *Natural Hazards*, 65(3), 2385–2397. <http://doi.org/10.1007/s11069-012-0407-y>
- Del Río, L., Gracia, F. J. y Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252–266. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027>
- Díaz, P., Fernández, M., Prieto, A. y Ojeda, J. (2012). La línea de costa como base para la generación de indicadores de estado y de seguimiento ambiental. En *Tecnologías de la información geográfica en el contexto del cambio global* (pp. 29–38).
- Díaz, P., Ojeda, J., Álvarez, J. I. y Prieto, A. (2014). Sensibilidad de las playas en función de la accesibilidad de los potenciales usuarios turísticos (plazas regladas) en la costa andaluza y los proceso de erosión. En *Tecnologías de la Información para Nuevas Formas de ver el Territorio* (pp. 954–966).
- Díaz, P., Prieto, A. y Ojeda, J. (2013). Modelo de datos de línea de costa como soporte para la caracterización y cálculo de indicadores en la zona de transición costera: la costa andaluza. En *Espacios insulares y de frontera. Una visión geográfica* (pp. 361–369).
- Dolan, R., Fenster, M. S. y Holme, S. J. (1991). Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723–744.
- Dolan, R., Hayden, B. y Heywood, J. (1978). A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2, 21–39. [http://doi.org/10.1016/0378-3839\(78\)90003-0](http://doi.org/10.1016/0378-3839(78)90003-0)
- Dolan, R., Hayden, B., May, B. P. y May, S. (1980). The reability of shoreline change measurements form aerial photographs. *Shore & Beach*, 48, 22–29.
- Domínguez, L. (2003). *Aproximación al conocimiento de la erosión costera en el litoral entre Sanlúcar de Barrameda y Rota (Provincia de Cádiz)*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Puerto Real. 140 pp.
- Domínguez, L., Gracia, F. J. y Anfuso, G. (2004). Tasas de avance/retroceso de la línea de costa mediante morfometría fotogramétrica en el sector Sanlúcar de Barrameda - Rota (Provincia de Cádiz). *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 17(1–2), 71–86.
- Domínguez, L., Gracia, F. J. y Anfuso, G. (2008). Evaluación de la vulnerabilidad del litoral noroeste de la Provincia de Cádiz frente a la erosión. *Territoris*, 7, 99–113.
- Douglas, B. C. (1991). Global sea level rise. *Journal of Geophysical Research*, 96, 6981 – 6992.
- Douglas, B. C. y Crowell, M. (2000). Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 145–152.
- Douglas, J. (2007). Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(2), 283–288. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00330925/document>

- Dunn, C. E. (2007). Participatory GIS - a people's GIS? *Progress in Human Geography*, 31(5), 616–637. <http://doi.org/10.1177/0309132507081493>
- Durán, C., Benavente, J. y Del Río, L. (2014). Riesgo de inundación por temporales extremos en la Playa de la Victoria (Cádiz). *Cuaternario Y Geomorfología*, 28(3–4), 21–45.
- Espinosa, V. y Rodríguez, I. (2009). Evolución costera del tramo comprendido entre San Juan de los Terreros y playas de Vera (Almería). *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 22(1–2), 3–12.
- Fernández, F. (2000). *Introducción a la fotointerpretación* (1ª ed.). Barcelona: Ariel Ciencia. 253 pp.
- Fernández, M., Díaz, P., Ojeda, J., Prieto, A. y Sánchez, N. (2015). Multipurpose line for mapping coastal information using a data model: the Andalusian coast (Spain). *Journal of Coastal Conservation*, 19(4), 461–474. <http://doi.org/10.1007/s11852-015-0400-1>
- Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S. y Richmond, B. (2003). Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 38, 106–124.
- Flor-Blanco, G., Pando, L., Morales, J. A. y Flor, G. (2015). Evolution of beach–dune fields systems following the construction of jetties in estuarine mouths (Cantabrian coast, NW Spain). *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 1317–1330. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3485-1>
- Flores, E., Rodríguez, J., Ballesta, M., Rodríguez, A. y Cáceres, L. M. (1997). Cambios morfológicos actuales en la playa de Mazagón (Huelva). *Cuaternario Ibérico (AEQUA)*, 154–156.
- Fontán, A., Alcántara, J. y Corbí, A. (2008). Geodinámica de las Playas de Maspalomas y El Inglés, potencia sedimentaria y evolución geomorfológica reciente. En *X Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 291–294). Cádiz.
- Fontán, A., Alcántara, J. y Correa, I. D. (2012). Combined beach - inner shelf erosion in short and medium term (Maspalomas, Canary Island). *Geologica Acta*, 10(4), 411–426.
- Fraile, P. (2011). *Análisis de las problemáticas asociadas a la espacialización, evolución y representación de niveles del mar presentes y futuros en Andalucía*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla. 362 pp. Extraído de <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/1595/analisis-de-las-problematicas-asociadas-la-espacializacion-evolucion-y-representacion-de-niveles-del-mar-presentes-y-futuros-en-andalucia/>
- Fraile, P., Álvarez, J. I., Sánchez, N. y Ojeda, J. (2013). Análisis comparativo de la exposición a la subida del nivel medio del mar de la playa y marismas de Valdelagrana (Cádiz). En *VII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 167–170). Oviedo.

- Fraile, P. y Fernández, M. (2016). Escenarios de subida del nivel medio del mar en los mareógrafos de las costas peninsulares de España en el año 2100. *Estudios Geográficos*, 77(280), 57–79. <http://doi.org/10.3989/estgeogr.201603>
- Fraile, P., Sánchez, N. y Ojeda, J. (2014). Sensibilidad del cálculo de los niveles medio del mar al método y período de las series temporales de los mareógrafos en los procesos de inundación: Valdelagrana (Cádiz). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.*, 65, 59–70.
- Frieyro, J. E., Ojeda, J., Gimenez de Azcárate, F., Cáceres, F. y Moreira, J. M. (2010). Desarrollo del Sistema de Información sobre el Litoral y el Medio Marino de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). En *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 97–107). Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Frihy, O. E., Nasr, S. M., El Hattab, M. M. y El Raey, M. (1994). Remote sensing of beach erosion along the Rosetta promontary, northwestern Nile delta, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, 15(8), 1649–1660.
- García, D. y Vallejo, I. (2012). Caracterización y modelos de funcionamiento del sistema playa-duna en el Parque Nacional de Doñana (Huelva, España). En *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica* (pp. 61–69). Madrid.
- Gavala, J. (1992). *Geología de la costa y Bahía de Cádiz (El poema ora marítima de Avieno)*. Servicio de publicaciones de la Diputación provincial de Cádiz. 349 pp.
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N. y Rooney, J. J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 231, 87–105. <http://doi.org/10.2112/05-0521.1>
- George, P. (1991). *Diccionario de geografía*. Madrid: Akal. 622 pp.
- Gibbard, P. L. y Cohen, K. M. (2008). Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years. *Episodes*, 31, 243–247.
- Gómez, J. (2014). La degradación de dunas litorales en Andalucía: aproximación geohistórica y multiescalar. *Investigaciones Geográficas*, (62). <http://doi.org/10.14198/INGEO2014.62.02>
- Gonçalves, R. M., Awange, J. L., Krueger, C. P., Heck, B. y Coelho, L. D. S. (2012). A comparison between three short-term shoreline prediction models. *Ocean & Coastal Management*, 69, 102–110. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.07.024>
- González, F. J., Quiros, R., Cano, M., Sánchez, J. y Dalda, A. (2004). El cambio de datum ED50-ETRS89. Métodos y resultados. En *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía. Topcart 2004* (pp. 1–8). Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía.
- Gorokhovich, Y. y Leiserowiz, A. (2012). Historical and future coastal changes in Northwest Alaska. *Journal of Coastal Research*, 278, 174–186. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00031.1>

- Gracia, F. J., Anfuso, G., Benavente, J., Del Río, L., Domínguez, L. y Martínez, J. A. (2005). Monitoring coastal erosion at different temporal scales on sandy beaches: application to the Spanish Gulf of Cadiz coast. *Journal of Coastal Research*, (Special Issue 49), 22–27.
- Gracia, F. J., Benavente, J., Anfuso, G., Reyes, J. L. y Del Río, L. (2005). Velocidades y tendencias de cambio morfológico interanual en las playas del entorno de la Bahía de Cádiz. En E. Sanjaume & J. F. Mateu (Eds.), *Geomorfología litoral i quaternari: homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger* (pp. 181–193). Valencia: Servicio de publicaciones de la Universidad de Valencia.
- Green, E., Edwards, A. y Mumby, P. (2000). Mapping Bathymetry. In A. Edwards (Ed.), *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management* (pp. 219–235). París: UNESCO.
- Greenwood, B. y McGillivray, D. G. (1978). Theoretical Model of the Littoral Drift System in the Toronto Waterfront Area, Lake Ontario. *Journal of Great Lakes Research*, 4(1), 84–102. [http://doi.org/10.1016/S0380-1330\(78\)72169-6](http://doi.org/10.1016/S0380-1330(78)72169-6)
- Guariglia, A., Buonamassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M. L., Zaccagnino, A. y Colangelo, A. (2006). A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes. *Annals of Geophysics*, 49(1), 295–304.
- Guisado, E. y Malvárez, G. (2015a). El estado morfodinámico de las playas a través de modelización numérica de propagación y asomeramiento del oleaje: el frente litoral de Doñana. *Geofocus*, 15, 163–180.
- Guisado, E. y Malvárez, G. (2015b). El rol de las tormentas en la evolución morfodinámica del Delta del río Vélez: Costa del Sol, Málaga. En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 189–192). Marbella.
- Guisado, E., Malvárez, G., Navas, F. y Carrero, R. (2014). Spatial distribution of storm wave energy dissipation for the assessment of beach morphodynamics. *Journal of Coastal Research*, 70, 259–265. <http://doi.org/10.2112/SI70-044.1>
- Gutiérrez, J. M., Luna, A., Parrado, J. M., Sánchez, E., Fernández-Palacios, A. y Ojeda, J. (1999). Variaciones de turbidez de las aguas de la bahía de Cádiz determinadas a partir del análisis de imágenes Landsat TM. *Geogaceta*, 27, 79–82.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D. y Ranasinghe, R. (2011). Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring. *Coastal Engineering*, 58(2), 194–205. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.09.006>
- Harris, M., Brock, J., Nayegandhi, A. y Duffy, M. (2006). *Extracting shorelines from NASA airborne topographic lidar-derived digital elevation models*. Reston, Virginia. Extraído de <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1427/ofr-2005-1427.pdf>
- Harvey, A. M., Silva, P. G., Mather, A. E., Goy, J. L., Stokes, M. y Zazo, C. (1999). The impact of Quaternary sea-level and climatic change on coastal alluvial fans in the Cabo de Gata ranges, southeast Spain. *Geomorphology*, 28, 1–22.
- HIDTMA. (2001). *Plan Director para la Gestión Sostenible de la Costa. Demarcación Hidrográfica de Guadiana y Guadalquivir*. 5 tomos.

- Hughes, M. L., McDowell, P. F. y Marcus, W. A. (2006). Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, 74(1–4), 1–16.
<http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.001>
- Ibarra, A. D. (2016). *Análisis y evolución de las playas en la Región de Murcia*. Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia, Murcia. 343 pp.
- Ibarra, D., Belmonte, F., Gomariz, F. y Pérez, P. (2015). Evolución de la línea de costa en la Región de Murcia (1956-2013). En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 33–36). Marbella.
- Intergovernmental Panel on Climate Change -IPCC- (2014). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 1535 pp.
- Jabaloy, A., Lobo, F. J., Azor, A., Bárcenas, P., Fernández, L. M., Díaz, V. y Pérez, J. V. (2010). Human-driven coastline changes in the Adra River deltaic system, southeast Spain. *Geomorphology*, 119, 9–22.
- Jabaloy, A., Lobo, F. J., Bárcenas, P., Azor, A., Fernández, L. M. y Díaz, V. (2008). Evolución reciente del delta del río Adra (SE España). *Geotemas*, 10, 743–746.
- Jensen, J. R. y Cowen, D. C. (2011). Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. En M. Dodge, R. Kitchin, & C. Perkins (Eds.), *The Map Reader: Theories of Mapping Practice and Cartographic Representation* (pp. 153–163). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
<http://doi.org/10.1002/9780470979587.ch22>
- Jevrejeva, S., Moore, J. C. y Grinsted, A. (2010). How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? *Geophysical Research Letters*, 37(7), n/a-n/a. <http://doi.org/10.1029/2010GL042947>.
Extraído de http://nora.nerc.ac.uk/13933/1/Jevrejeva_2010.pdf
- Jevrejeva, S., Moore, J. C. y Grinsted, A. (2012). Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 80–81, 14–20. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.09.006>
- Jones, T. G., Coops, N. C. y Sharma, T. (2010). Assessing the utility of airborne hyperspectral and LiDAR data for species distribution mapping in the coastal Pacific Northwest, Canada. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2841–2852.
<http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.002>
- Kabuth, A. K., Kroon, A. y Pedersen, J. B. T. (2014). Multidecadal shoreline changes in Denmark. *Journal of Coastal Research*, 296, 714–728.
<http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00139.1>
- Kerr, J. T. y Ostrovsky, M. (2003). From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6), 299–305.
[http://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00071-5](http://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00071-5)

- Kim, H., Lee, S. B. y Min, K. S. (2017). Shoreline change analysis using airborne LiDAR bathymetry for coastal monitoring. *Journal of Coastal Research*, 79, 269–273. <http://doi.org/10.2112/SI79-055.1>
- Komar, P. D. (1976). *Beach processes and sedimentation*. (1ª ed.). Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 429 pp.
- Kuleli, T. (2010). Quantitative analysis of shoreline changes at the Mediterranean Coast in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 167(1–4), 387–397. <http://doi.org/10.1007/s10661-009-1057-8>
- Labrador, M., Évora, J. A. y Arbelo, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio* (1ª ed.). Tenerife, España: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.
- Lantuit, H. y Pollard, W. H. (2008). Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology*, 95(1–2), 84–102. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.040>
- Lario, J., Zazo, C., Dabrio, C.J., Somoza, L., Goy, J.L., Bardají, T. y Silva, P.G. (1995). Record of recent holocene sediment input on spit bars and deltas of South Spain. *Journal of Coastal Research*, (special issue 17), 241-245
- Lario, J. (1996). *Último y presente interglacial en el área de conexión Atlántico-Mediterráneo (sur de España)*. Variaciones del nivel del mar paleoclima y paleoambiente. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 256 pp.
- Larson, M. (1991). Equilibrium profile of a beach with varying grain size. En N. C. Kraus, K. J. Gingerich, & D. L. Kriebel (Eds.), *Coastal sediments '91: proceedings of a Specialty Conference on Quantitative Approaches to Coastal Sediment Processes* (pp. 905–919). Seattle: American Society of Civil Engineers.
Extraído de <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0071720>
- Lechuga, A. (1995). Problemas y técnicas de prevención en dinámica litoral aplicadas a España. In *Reducción de los riesgos geológicos en España* (pp. 123–131). Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Lechuga, A., De la Peña, J. M. y Sánchez, F. J. (2002). Propuesta de ordenación de la costa de Málaga. En *I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente* (pp. 387–396). Madrid.
- Lee, I. C., Wu, B. y Li, R. (2009). Shoreline extraction from the integration of lidar point cloud data and aerial orthophotos using mean shift segmentation. En *Proceedings of the ASPRS 2009 Annual Conference* (p. 7). Baltimore.
- Lee, J. M., Park, J. Y. y Choi, J. Y. (2013). Evaluation of sub-aerial topographic surveying techniques using total station and RTK-GPS for applications in macrotidal sand beach environment. *Journal of Coastal Research*, 65, 535–540. <http://doi.org/10.2112/SI65-091.1>
- Lesser, M. P. y Mobley, C. D. (2007). Bathymetry, water optical properties, and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery. *Coral Reefs*, 26(4), 819–829. <http://doi.org/10.1007/s00338-007-0271-5>

- Liceaga, M. A. y Euan, J. I. (2002). Assessment of coral reef bathymetric mapping using visible Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(1), 3–14. <http://doi.org/10.1080/01431160010008573>
- Limber, P. W., List, J. H. y Warren, J. D. (2005). *Investigating methods of mean high water shoreline extraction from LiDAR data and the relationship between photo-derived and datum-based shorelines in North Carolina*. Extraído de http://ims.ncdenr.org/Website/ncshore/MetaData/2004_Shoreline_Study.pdf
- List, J. H., Sallenger, A. H., Hansen, M. E. y Jaffe, B. E. (1997). Accelerated relative sea-level rise and rapid coastal erosion. *Marine Geology*, 140(3–4), 347–365. [http://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00035-2](http://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00035-2)
- Lorenzo, F., Alonso, A. y Pagés, J. L. (2003). Evolución y erosión comparada de tres sistemas playa/flecha en las rías de Ortigueira, O Barqueiro y Viveiro (Galicia, España). *Cuaternario Y Geomorfología*, 17(1–2), 75–89.
- Maio, C. V., Gontz, A. M., Tenenbaum, D. E. y Berkland, E. P. (2012). Coastal hazard vulnerability assessment of sensitive historical sites on Rainsford Island, Boston Harbor, Massachusetts. *Journal of Coastal Research*, 278, 20–33. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00104.1>
- Maiti, S. y Bhattacharya, A. K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 257(1–4), 11–23. <http://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.10.006>
- Maldonado, A. (2009). El delta del Guadalfeo. En *XXVII Semana de estudios del mar* (pp. 188–212). Motril.
- Malvárez, G., Navas, F. y Jackson, D. W. T. (2004). Investigations on the morphodynamics of sandy tidal flats: a modeling application. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 731–747. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.006>
- Manzano, G., Muñoz, A. y Manzano, F. (2004). Estudio de la evolución de la línea de costa entre Almería y Retamar mediante la integración de diferentes fuentes de información en un SIG. En *XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica* (pp. 1–10). Zaragoza.
- Marín, C. (2005). *Estructura y evolución tectónica reciente del Campo de Dalías y de Níjar en el contexto del límite meridional de las Cordilleras Béticas orientales*. Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, Granada. 307 pp. Extraído de <http://hdl.handle.net/10481/619>
- Marrack, L. (2015). Incorporating Groundwater Levels into Sea-Level Detection Models for Hawaiian Anchialine Pool Ecosystems. *Journal of Coastal Research*, 315, 1170–1182. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00043.1>
- Mars, J. C. y Houseknecht, D. W. (2007). Quantitative remote sensing study indicates doubling of coastal erosion rate in past 50 yr along a segment of the Arctic coast of Alaska. *Geology*, 35(7), 583. <http://doi.org/10.1130/G23672A.1>
- Martín, A. (1985). La estructura de las unidades del Flysch del Campo de Gibraltar, consecuencias tectónicas y paleográficas. *Boletín Geológico y Minero*, 96(2), 3–26.

- Martín, J. A., Roig, F. X., Pons, G. X., Rodríguez, A., Alvarado, M. y Mir, M. (2013). Description of erosion processes in Spratt Bight (San Andrés Island, Colombia) using Sequential End Point Rates (EPR). *Journal of Coastal Research*, 65, 997–1002. <http://doi.org/10.2112/SI65-169.1>
- Martín, J. A., Roig, F. X., Rodríguez, A., Mir, M., Pons, G. X. y Gelabert, B. (2016). La erosión histórica de la playa de sa Ràpita (S. Mallorca). *Investigaciones Geográficas*, (66). <http://doi.org/10.14198/INGEO2016.66.08>
- Medina, R., Bernabeu, A. M. y Vidal, C. (2002). Efecto de la reflexión sobre la forma de equilibrio del perfil de playa: validación para la costa de la Península Ibérica. *Cuaternario Y Geomorfología*, 16(1–4), 83–95. Extraído de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3095796>
- Medina, R., Losada, M. A., Losada, I. J. y Vidal, C. (1994). Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. *Marine Geology*, 118(3–4), 195–206. [http://doi.org/10.1016/0025-3227\(94\)90083-3](http://doi.org/10.1016/0025-3227(94)90083-3)
- Ménanteau, L., Vanney, J. R. y Zazo, C. (1983). Baelo et son environnement (déroit de Gibraltar) Etude physique d'un site antique. *Publications de la Casa de Velazquez*, 4, 38–221.
- Mimura, N. y Nobuoka, H. (1995). Verification of the Bruun Rule for the estimation of shoreline retreat caused by sea-level rise. *Coastal Dynamics*, 95, 607–616.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente -MAPAMA- (2004). *Impactos en la costa española por efecto del cambio climático. Fase 1. Evaluación de cambio en la dinámica costera española*. Santander. 480 pp.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente -MAPAMA- (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. (1ª ed.). 243 pp. Extraído de http://www.magrama.gob.es/es/costas/publicaciones/manual_restauracion_dunas.aspx
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente -MAPAMA- (2009). *Estudio ecocartográfico del litoral de las provincias de Granada, Almería y Murcia*. Madrid. 115 pp.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente -MAPAMA- (2013a). *Estudio de la dinámica litoral, defensa y propuesta de mejora en las playas con problemas: estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir*. Madrid. 169 pp.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente -MAPAMA- (2013b). *Estudio ecocartográfico del litoral de la provincia de Cádiz*. Madrid. 85 pp.
- Mir, M. (2009). Modificaciones del perfil de playas en Islas Baleares (playas de Can Picafort y Es Comú De Muro). *Investigaciones Geográficas*, 50, 191–207.
- Mir, M., Blanco, R., Hernández, A. I., Pons, G. X., Costa, M. y Hernández, L. (2015). Comparación descriptiva de morfologías blowout bajo diferentes condiciones ambientales. En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 205–208). Marbella.

- Mitasova, H. (2004). Quantifying rapid changes in coastal topography using modern mapping techniques and Geographic Information System. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10(1), 1–11. <http://doi.org/10.2113/10.1.1>
- Mitasova, H., Overton, M. F., Recalde, J. J., Bernstein, D. J. y Freeman, C. W. (2009). Raster-based analysis of coastal terrain dynamics from multitemporal LiDAR data. *Journal of Coastal Research*, 252, 507–514. <http://doi.org/10.2112/07-0976.1>
- Montesdeoca, I., Vivares, A., Alcántara, J. y Alonso, I. (2001, July). Aproximación a la modelización de la dinámica litoral de las playas de El Inglés y Maspalomas (Gran Canaria). *Vector Plus*, 17–27.
- Moore, L. J. y Griggs, G. B. (2002). Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181(1–3), 265–283. [http://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00271-7](http://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00271-7)
- Moore, L. J., Ruggiero, P. y List, J. H. (2006). Comparing mean high water and high water line shorelines: Should proxy-datum offsets be incorporated into shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, 224, 894–905. <http://doi.org/10.2112/04-0401.1>
- Morales, J. A. (1993). *Sedimentología del estuario del Guadiana (SW España-Portugal)*. Sevilla. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla: Servicio de publicaciones de la Universidad de Huelva (1995). 272 pp.
- Morales, J. A. (1997). Evolution and facies architecture of the mesotidal Guadiana River delta (S.W. Spain-Portugal). *Marine Geology*, 138(1–2), 127–148. [http://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00009-1](http://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00009-1)
- Morales, J. A. y Borrego, J. (2008). El litoral de Huelva: fisiografía y dinámica. En M. Olías (Ed.), *Geología de Huelva: lugares de interés geológico*. (2nd ed., pp. 28–34). Huelva: Universidad de Huelva. Extraído de <http://hdl.handle.net/10272/8321>
- Morales, J. A., Delgado, I. y Gutiérrez, J. M. (2015). Bedform variability and flow regime in a barrier-inlet system. The mesotidal Piedras mouth (Huelva, SW Spain). *Geologica Acta*, 13(2), 137–153.
- Morales, J. A., Pendon, G. y Borrego, J. (1994). Origen y evolución de flechas litorales recientes en la desembocadura del estuario mesomareal del río Guadiana (Huelva, SO de España). *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 7(1–2), 155–167. Extraído de [http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/7\(1-2\)/Art11.pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos/REV/7(1-2)/Art11.pdf)
- Morales, J. A., Sedrati, M., Cantano, M., Rodríguez, A., Delgado, I., Lozano, C. y Flor-Blanco, G. (2014). From the continent to the coast: the bedload transport across the lower sector of the Guadiana River Mouth (Spain-Portugal). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 3, 55–64.
- Moreno, G. y Cortés, J. (2011). La exactitud posicional de la cartografía histórica. *Revista Patrimonio Histórico*, 62–65.
- Morton, B. (2016). A 62-year analysis of historical aerial images showing human impacts on beach topography in Hoi Ha Wan Marine Park, Hong Kong. Implications for marine park management and sustainability with a changing global climate. *Journal of Coastal Conservation*, 1–22. <http://doi.org/10.1007/s11852-016-0451-y>

- Morton, R. A., Miller, T. L. y Moore, L. J. (2004). *National assessment of shoreline change: Part 1 historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S Gulf of Mexico*. Open-file Report.
- Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., Hazra, S. y Mitra, D. (2012). Automatic shoreline detection and future prediction: A case study on Puri Coast, Bay of Bengal, India. *European Journal of Remote Sensing*, 201–213. <http://doi.org/10.5721/EuJRS20124519>
- Muñoz, J. J. y Enríquez, J. (1998). Dinámica litoral de una unidad fisiográfica completa: Sanlúcar-Rota. *Revista de Obras Públicas*, 3375, 35–44.
- Nandi, S., Ghosh, M., Kundu, A., Dutta, D. y Baksi, M. (2016). Shoreline shifting and its prediction using remote sensing and GIS techniques: a case study of Sagar Island, West Bengal (India). *Journal of Coastal Conservation*, 20(1), 61–80. <http://doi.org/10.1007/s11852-015-0418-4>
- Organisation for Economic Cooperation and Development -OECD- (2001). *Citizens as Partners. Information, consultation and public participation in policy-making*. París. 268 pp.
- Ojeda, J. (1988a). *Aplicaciones de la teledetección al estudio de la dinámica litoral (Huelva): geomorfología y ordenación litoral*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla. 409 pp. (Inédita)
- Ojeda, J. (1988b). Peculiaridades morfodinámicas de la fachada ibérica del Golfo de Cádiz: geomorfología litoral. *Revista de Estudios Andaluces*, 10, 53–68. Extraído de http://institucional.us.es/revistas/andaluces/10/art_4.pdf
- Ojeda, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.*, 30, 103–118.
- Ojeda, J. (2003). Las costas andaluzas. En A. López Ontiveros (Ed.), *Geografía de Andalucía* (1ª. ed, pp. 118–135). Barcelona: Ariel.
- Ojeda, J. (2005). Deltas, playa submarina y cambios en la línea de costa en costas mesomareales: los deltas de los ríos Guadiana y Carreras. En E. Sanjaume & J. F. Mateu (Eds.), *Geomorfología litoral i quaternari: homenatge al professor Vicenç M. Rosselló i Verger* (pp. 283-292). Valencia: Servicio de publicaciones de la Universidad de Valencia.
- Ojeda, J. (2015). Los procesos erosivos de las playas en la nueva “Ley de Costas”. Reflexiones desde la geomorfología litoral. En J. Rodríguez & M. C. Núñez (Eds.), *Litoral de Andalucía. Norma y naturaleza* (1ª ed., pp. 13–39). Universidad de Huelva.
- Ojeda, J., Álvarez, J. I., Cabrera, A., Díaz, P. y Prieto, A. (2013). Instrumentos para el conocimiento, la difusión y gobernanza de las zonas litorales: visores 3D (desktop y web). Costa de Andalucía. *Geotemas*, 14, 31–34.
- Ojeda, J., Álvarez, J. I., Martín, D. y Fraile, P. (2009). El uso de las Tecnologías de la Información Geográfica para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *Geofocus*, 9, 83–100.

- Ojeda, J., Borgniet, L., Pérez, A. M. y Loder, J. F. (2002). Monitoring morphological changes along the coast of Huelva (SW Spain) using soft-copy photogrammetry and GIS. *Journal of Coastal Conservation*, 8(1), 69.
[http://doi.org/10.1652/1400-0350\(2002\)008\[0069:MMCATC\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1652/1400-0350(2002)008[0069:MMCATC]2.0.CO;2)
- Ojeda, J. y Cabrera, A. (2006). Utilidades y funcionalidades de un visor tridimensional interactivo en la gestión litoral. *Cuadernos geográficos*, 39(2), 41–52.
- Ojeda, J., Cabrera, A., García, M. y Gómez, A. (2010). Visores 3D, servicios interoperables e información geográfica: aplicaciones en ciencias de la Tierra. En *La información geográfica al servicio de los ciudadanos de lo global a lo local* (pp. 1317–1329). Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla : Asociación de Geógrafos Españoles.
- Ojeda, J., Díaz, P., Álvarez, J. I., Pérez, J. P. y Prieto, A. (2015). Geoportales y geovisores web: Un nuevo entorno colaborativo para la producción, acceso y difusión de la información geográfica. In *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 777–786).
- Ojeda, J., Díaz, P., Prieto, A. y Álvarez, J. I. (2013). Línea de costa y sistemas de información geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa andaluza. *Investigaciones Geográficas*, 60.
<http://doi.org/10.14198/INGEO2013.60.02>
- Ojeda, J., Fernández-Palacios, A., Moreira, J. M., Sánchez, E. y Parada, M. (1993). Programa de seguimiento de la calidad y dinámica del espacio marino y litoral de Andalucía, a través de imágenes de satélite. En M. Cantón (Ed.), *V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección* (pp. 119–134). Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Publicaciones - Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Ojeda, J., Fernández, M., Prieto, A., Pérez, J. P. y Vallejo, I. (2010). Levantamiento de líneas de costa a escala de detalle para el litoral de Andalucía: criterios, modelo de datos y explotación. In *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 324–336). Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Ojeda, J., Sánchez, R., Prieto, A. y Díaz, P. (2015). Tasas de erosión costera y ortofotos históricas: Una propuesta de corrección geométrica direccional. En *Teledetección: humedales y espacios protegidos* (pp. 612–615).
- Ojeda, J. y Vallejo, I. (1995). La flecha de El Rompido: análisis morfométrico y modelos de evolución durante el periodo 1943-1991. *Revista de La Sociedad Geológica de España*1, 8(3), 229–237.
- Ojeda, J. y Vallejo, I. (2008). Análisis morfométricos de las dunas móviles de Andalucía y Canarias: fotogrametría y Lidar. Nuevas herramientas para la difusión de la información sobre las zonas costeras. En *Actas de las jornadas técnicas. Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras* (pp. 69–74). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Ojeda, J., Vallejo, I. y González, G. (2001). El acceso de los Estados al mar: áreas costeras y cuencas marinas. En J. L. Suárez (Ed.), *Los océanos. Medio ambiente, recursos y políticas marinas*. (p. 41-68). Barcelona: Serbal.

- Overton, M. F. y Fisher, J. S. (1997). Shoreline analysis using digital photogrammetry. In *Coastal Engineering 1996* (pp. 3750–3761). New York: American Society of Civil Engineers. <http://doi.org/10.1061/9780784402429.289>
- Ozturk, D., Beyazit, I. y Kilic, F. (2015). Spatiotemporal analysis of shoreline changes of the Kizilirmak Delta. *Journal of Coastal Research*, 316, 1389–1402. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00159.1>
- Paine, J., Claude, T. L. y Andrews, J. R. (2016). Shoreline and sand storage dynamics from annual airborne LIDAR surveys, Texas Gulf Coast. *Journal of Coastal Research*. <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00241.1>
- Pajak, M. J. y Leatherman, S. P. (2002). The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, 18(2), 329–337.
- Pardo, J. E. (1991). *La erosión antrópica en el litoral valenciano*. Tesis Doctoral. Universitat de València, Valencia: Conselleria d'obres publiques, urbanisme i transports, Generalitat Valenciana. 240 pp.
- Pardo, J. E., Almonacid, J., Ruiz, L. A. y Palomar, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123, 1–11. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024>
- Pardo, J. E., Almonacid, J., Ruiz, L. A., Palomar, J. y Rodrigo, R. (2014). Evaluation of storm impact on sandy beaches of the Gulf of Valencia using Landsat imagery series. *Geomorphology*, 214, 388–401. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.020>
- Pardo, J. E., García, L., Palomar, J. y Garrigues, P. (2005). New methods and tools to analyze beach-dune system evolution using a Real-Time Kinematic Global Positioning System and Geographic Information Systems. *Journal of Coastal Research*, (Special Issue 49), 34–39.
- Pardo, J. E. y Sanjaume, E. (2001). Análisis multiescalar de la erosión costera. *Cuadernos de Geografía*, 69(70), 95–125.
- Pastol, Y. (2011). Use of airborne LIDAR bathymetry for coastal hydrographic surveying: the french experience. *Journal of Coastal Research*, 62, 6–18. http://doi.org/10.2112/SI_62_2
- Peltier, W. R. y Tushingham, A. M. (1989). Global sea level rise and the greenhouse effect: Might they be connected? *Science*, 244(4906), 806–810. <http://doi.org/10.1126/science.244.4906.806>
- Pérez, A. (2015). La integración de técnicas aplicadas al control de la dinámica de las playas de bloques (coidos). En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 61–64). Marbella.
- Pilkey, O. H., Young, R. S., Riggs, S. R., Smith, A. W. S., Huiyan, W. y Pilkey, W. D. (1993). The concept of shoreface profile of equilibrium: a critical review. *Journal of Coastal Research*, 9(1), 255–278. Extraído de <http://www.jstor.org/stable/4298082>

- Prieto, A. (2012). *Propuesta metodológica para el cálculo de tasas de erosión aplicada a los deltas mediterráneos andaluces (1956-2009)*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Sevilla, Sevilla. 109 pp. (Inédita).
- Prieto, A., Ojeda, J., Rodríguez, S., Gracia, F. J. y Del Río, L. (2012). Procesos erosivos (tasas de erosión) en los deltas mediterráneos andaluces: herramientas de análisis espacial (DSAS) y evolución temporal (servicios OGC). En *Tecnologías de la información geográfica en el contexto del cambio global* (pp. 185–195).
- Puig, J. M. (2016). *Análisis de las variables que controlan la evolución de la costa a corto-medio plazo. Aplicación a la Bahía de Cádiz*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, Puerto Real.
- Puissant, A., Lefèvre, S. y Weber, J. (2008). Coastline extraction in VHR imagery using mathematical morphology with spatial and spectral knowledge. En *Integrated Coastal Zone* (pp. 1305–1310). Pekín: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Purkis, S. J., Myint, S. W. y Riegl, B. M. (2006). Enhanced detection of the coral *Acropora cervicornis* from satellite imagery using a textural operator. *Remote Sensing of Environment*, 101(1), 82–94. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.009>
- Purkis, S. J. y Riegl, B. M. (2005). Spatial and temporal dynamics of Arabian Gulf coral assemblages quantified from remote-sensing and in situ monitoring data. *Marine Ecology Progress Series*, 287, 99–113. <http://doi.org/10.3354/meps287099>
- Pye, K. y Blott, S. J. (2008). Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: An investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast, UK. *Geomorphology*, 102(3–4), 652–666. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.06.011>
- Quevedo, U. y Hernández, L. (2014). Evolución reciente de la línea de costa en un sistema playa-dunas deficitario (Maspalomas, Gran Canaria). En *Tecnologías de la Información para Nuevas Formas de ver el Territorio* (pp. 163–171). Alicante.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810), 368–370. <http://doi.org/10.1126/science.1135456>
- Ramírez, J. M., Rodríguez, I., Gracia, F. J., Sánchez, M. J. y Barrio, F. (2016). Application of change detection techniques in geomorphological evolution of coastal areas. Example: Mouth of the River Ebro (period 1957–2013). *Applied Geography*, 75, 12–27. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.015>
- Ranasinghe, R., Callaghan, D. y Stive, M. J. F. (2012). Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climatic Change*, 110(3–4), 561–574. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0107-8>
- Rangel, N. y Anfuso, G. (2011). Respuesta morfodinámica de la Playa de Levante (Cádiz, SO de España) ante los temporales del invierno 2009-2010. En *Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 147–151). Tarragona.

- Reyes, J. L., Benavente, J., Gracia, F. J. y López, F. (1996). Efectos de los temporales sobre las playas de la Bahía de Cádiz. En A. Grandal & J. L. Pagés (Eds.), *IV Reunión de Geomorfología* (pp. 631–643). O Castro (A Coruña): Sociedad Española de Geomorfología.
- Rivas, V. y Cendrero, A. (1992). Análisis histórico de la evolución superficial de los estuarios del País Vasco. *Lurralde: Investigación Y Espacio*, 15, 199–227.
- Rodríguez, A. (1999). Modificación antropogénica de la dinámica marina en la costa de Mazagón (Huelva). En *Avances en el estudio del Cuaternario español: secuencias, indicadores paleoambientales y evolución de procesos* (pp. 43–48). Gerona: Universitat de Girona.
- Rodríguez, A., Cáceres, L. M., Rodríguez, J. y Cantano, M. (2000). Relación entre clima y génesis de crestas/surcos de playa en los últimos cuarenta años (Huelva, Golfo de Cádiz). *Cuaternario Y Geomorfología*, 14(3–4), 109–113.
- Rodríguez, A., Morales, J. A., Carro, B., Cantano, M. y Lozano, C. (2011). Distribución de fondos sedimentarios frente a la desembocadura del río Guadalquivir (SW España). En I. Montoya, I. Rodríguez, & M. J. Sánchez (Eds.), *VI Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 135–138). Tarragona.
- Rodríguez, A., Morales, J. A., Delgado, I. y Cantano, M. (2008). The impact of man on the morphodynamics of the Huelva coast (SW Spain). *Journal of Iberian Geology*, 34(2), 313–327.
- Rodríguez, A., Rodríguez, J., Cáceres, L. M., Clemente, L., Cantano, M., Belluomini, G., Manfra, L. e Improta, S. (1997). Evolucion de la costa atlántica onubense (SO España) desde el Máximo Flandriense a la actualidad. *Boletín Geológico Y Minero*, 108(4–5), 465–475.
- Rodríguez, I. (2001). Comparación de técnicas basadas en el tratamiento digital de imágenes de satélite para la obtención de la línea de costa del delta del Ebro. En *Teledetección, medio ambiente y cambio global* (pp. 205–208). Lleida: Asociación Española de Teledetección.
- Rodríguez, I., Ramírez, J. M., Sánchez, M. J. y Montoya, I. (2013). Estudios de erosión con satélite en costas sedimentarias micromareales. En J. Alcántara, I. Montoya, & I. D. Correa (Eds.), *II Manual de métodos en Teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral* (pp. 177–197). Servicio de Publicaciones del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Roelvink, J. A. y Reniers, A. J. H. M. (2011). *A guide to modeling coastal morphology*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 292 pp.
- Rubiño, S., Carvajal, F. y Agüera, F. (2012). *Caracterización histórica de la evolución de la desembocadura del río Guadalfeo en la Costa Tropical (Granada)*. 58 pp.
- Ruggiero, P. y List, J. H. (2009). Improving Accuracy and Statistical Reliability of Shoreline Position and Change Rate Estimates. *Journal of Coastal Research*, 255, 1069–1081. <http://doi.org/10.2112/08-1051.1>
- Sánchez-Arcilla, A. y Jiménez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería Del Agua*, 1(2), 97–114.

- Sánchez, E. (2015). *Aplicación de la teledetección espacial al estudio de la dinámica y calidad de las aguas litorales: estudios mesomareales de la costa atlántica andaluza*. Sevilla. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla. 536 pp.
- Sánchez, M. J., Casamayor, M., Alonso, I. y Rodríguez, S. (2015). Evolución a largo plazo de la línea de costa en la playa de Las Canteras (Islas Canarias). En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 85–88). Marbella.
- Sánchez, N., Ojeda, J., Rodríguez, D. y Márquez, J. (2014). Assessment of different models for bathymetry calculation using SPOT multispectral images in a high-turbidity area: the mouth of the Guadiana Estuary. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 493–514. <http://doi.org/10.1080/01431161.2013.871402>
- Sánchez, V., Rodríguez, I. y Barrio, F. (2014). Evolución de la flecha de los Alfaques (Delta del Ebro) por medio de LIDAR. En S. Schnabel & A. Gómez (Eds.), *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014* (pp. 600–603). Cáceres.
- Sanjaume, E. y Gracia, F. J. (2011). *Las dunas en España*. Puerto Real: Sociedad Geológica de España. 261 pp.
- Sanjosé, J. J., Serrano, E., Berenguer, F., González, J. J., Gómez, M., González, M. y Guerrero, M. (2015). Evolución de la línea de costa para el período 1988-2014 de la playa de Somo (Cantabria), mediante el empleo de técnicas Geomáticas. En *VIII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 101–104). Marbella: Sociedad Geológica de España.
- Sanjosé, J. J., Serrano, E., Berenguer, F., González, J. J., Gómez, M., González, M. y Guerrero, M. (2016). Evolución histórica y actual de la línea de costa en la playa de Somo (Cantabria), mediante el empleo de la fotogrametría aérea y escáner láser terrestre. *Cuaternario Y Geomorfología*, 30(1–2), 119. <http://doi.org/10.17735/cyg.v30i1-2.41464>
- Sanz de Galdeano, C. (1983). Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*1, 39(3), 157–165.
- Schubart, H., Schulz, H. D., Arteaga, O. y Hoffman, G. (1989). Investigaciones geológicas y arqueológicas sobre la relación costera de los asentamientos fenicios en la Andalucía mediterránea. *Boletín de La Asociación Española de Amigos de La Arqueología*, 27, 61–66.
- Senciales, J. M. y Malvárez, G. (2003). La desembocadura del Río Vélez (provincia de Málaga, España). Evolución reciente de un delta de comportamiento mediterráneo. *Cuaternario y Geomorfología*, 17 (1 y 2), 47–61. Extraído de [http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol17/C&Q17\(1-2\)_07.pdf](http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol17/C&Q17(1-2)_07.pdf)
- Shackleton, N. J. y Cita, M. B. (1979). Oxygen and carbon isotope stratigraphy of benthic foraminifers at site 397: detailed history of climate change during the late Neogene. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 47, 433–445.
- Shackleton, N. J. y Hall, M. A. (1984). Oxygen and Carbon isotope stratigraphy of Deep Sea Drilling Project - Hole 552 A: Plio-Pleistocene glacial history. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 71, 599–609.

- Shackleton, N. J. y Opdyke, N. D. (1973). Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research*, 3(1), 39–55. [http://doi.org/10.1016/0033-5894\(73\)90052-5](http://doi.org/10.1016/0033-5894(73)90052-5)
- Shackleton, N. J. y Opdyke, N. D. (1976). Oxygen-Isotope and Paleomagnetic Stratigraphy of Pacific Core V28-239 Late Pliocene to Latest Pleistocene. En *Geological Society of America Memoirs* (Vol. 145, pp. 449–464). Geological Society of America.
Extraído de <http://memoirs.gsapubs.org/lookup/doi/10.1130/MEM145-p449>
- Shackleton, N. J. y Opdyke, N. D. (1977). Oxygen isotope and palaeomagnetic evidence for early Northern Hemisphere glaciation. *Nature*, 270(5634), 216–219. <http://doi.org/10.1038/270216a0>
- Short, A. D. (2001). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics* (1ª ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. 379 pp.
- Singh, G., Yamaguchi, Y., Boerner, W. M. y Park, S. E. (2013). Monitoring of the March 11, 2011, Off-Tohoku 9.0 Earthquake With Super-Tsunami Disaster by Implementing Fully Polarimetric High-Resolution POLSAR Techniques. *Proceedings of the IEEE*, 101(3), 831–846. <http://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2230311>
- Siripong, A. (2010). Detect the coastline changes in Thailand by remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 38, 992–996.
- Sistema de Análisis y Estadística del Turismo en Andalucía -SAETA- (2014). *El Turismo de litoral en Andalucía. Informe 2013*. Consejería de Turismo y Comercio. Junta de Andalucía. 15 pp. Extraído de http://www.turismoandaluz.com/estadisticas/sites/default/files/litoral_2013.pdf
- Stanchev, H., Young, R. y Stancheva, M. (2013). Integrating GIS and high resolution orthophoto images for the development of a geomorphic shoreline classification and risk assessment—a case study of cliff/bluff erosion along the Bulgarian coast. *Journal of Coastal Conservation*, 17(4), 719–728. <http://doi.org/10.1007/s11852-013-0271-2>
- Taney, N. E. (1961). *Geomorphology of the South shore of Long Island, New York*. United States Department of Defense. 94 pp.
- Thieler, E. R., Brill, A. L., Cleary, W. J., Hobbs, C. H. y Gammisch, R. A. (1995). Geology of the Wrightsville Beach, North Carolina shoreface: Implications for the concept of shoreface profile of equilibrium. *Marine Geology*, 126(1–4), 271–287. [http://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00082-A](http://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00082-A)
- Thieler, E. R. y Danforth, W. W. (1994). Historical Shoreline Mapping (I): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 549–563. Extraído de <http://www.jstor.org/stable/4298252>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L. y Ergun, A. (2009). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. United States Geological Survey. Open-File Report 2008-1278.

- Trenhaile, A. S. (1997). *Coastal dynamics and landforms*. Oxford : New York: Clarendon Press ; Oxford University Press.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E. y Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6), 306–314. [http://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](http://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)
- Valenzuela, C., Plomaritis, T. A., Benavente, J. y Puig, J. M. (2013). Comportamiento morfodinámico diferencial de dos tramos de una playa urbana (La Victoria, Cádiz). En *VII Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 131–134). Oviedo: Sociedad Geológica de España.
- Vales, J. J., Carpintero, I. R., Granado, L., Méndez, E., Montoya, G., Pino, I., Prieto, R., Giménez de Azcárate, F., Cáceres, F. y Moreira, J. M. (2010). Producción de ortofotos históricas para la generación de bases de datos temáticas. Cartografía de usos y coberturas del suelo. REDIAM. En J. Ojeda, M. F. Pita, & I. Vallejo (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 370–384). Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Vallejo, I., Sánchez, E. y Ojeda, J. (2000). Transformaciones territoriales y de la dinámica litoral en la Bahía de Algeciras: aplicaciones de los SIG y la Teledetección. *Tecnologías Geográficas Para El Desarrollo Sostenible*, 148–163.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431–1456. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
- Van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867–887. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>
- Van Thiel de Vries, J. S. M. (2009). *Dune erosion during storm surges*. Tesis Doctoral. Technische Universiteit Delft, Delft. 202 pp. Extraído de <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:885bf4b3-711e-41d4-98a4-67fc700461ff/?collection=research>
- Vanderstraete, T., Goossens, R. y Ghabour, T. K. (2003). Remote sensing as a tool for bathymetric mapping of coral reefs in the Red Sea (Hurghada – Egypt). *Belgeo*, 3(3), 257–268. <http://doi.org/10.4000/belgeo.16652>
- Vasseur, B. y Hequette, A. (2000). Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southwestern North Sea. *Geological Society, London, Special Publications*, 175(1), 99–107. <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.175.01.09>
- Vázquez, J. T. y Vegas, R. (2000). Acomodación de la convergencia entre África y la Península Ibérica, Golfo de Cádiz y Mar de Alborán, a partir del análisis de terremotos. *Geogaceta*, 27, 171–174.
- Viciano, A. (1994). La regeneración de las playas como adecuación del marco turístico en el espacio almeriense. En *Desarrollo regional y crisis del turismo en Andalucía: Actas del simposio hispano-francés* (pp. 201–219). Almería: Instituto de Estudios Almerienses.

- Viciano, A. (1998). *La erosión antrópica en las acumulaciones sedimentarias del litoral almeriense*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, Granada.
- Viciano, A. (1999). Las extracciones de áridos en el litoral de Almería para su utilización en la agricultura intensiva (1956-1997). En *Actas de las Jornadas sobre el litoral de Almería: caracterización, ordenación y gestión de un espacio geográfico* (pp. 83–110). Almería: Instituto de Estudios Almerienses.
- Viciano, A. (2001). *Erosión costera en Almería, 1957-1995. Textos y ensayos*. Almería: Instituto de Estudios Almerienses, Diputación de Almería. 551 pp.
- Vidal, C., Losada, M. A., Medina, R. y Losada, I. J. (1995). Modelos de morfodinámica de playas. *Ingeniería Del Agua*, 2(1). <http://doi.org/10.4995/ia.1995.2665>
- Vila, J. y Varga, D. (2008). Los Sistemas de Información Geográfica. En P. Andrés & R. Rodríguez (Eds.), *Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica* (pp. 357–376). Girona: Documenta Universitaria.
- Villa, G. (2006). Cartografía de imagen y bases de datos de imágenes aeroespaciales. En C. Pérez & A. L. Muñoz (Eds.), *Teledetección: nociones y aplicaciones* (1ª ed., p. 359). Universidad de Salamanca.
- Villar, A. y Ojeda, J. (2012). El desarrollo de una base de datos espacial sobre el proceso de urbanización en el litoral de Andalucía: Indicadores del colapso inmobiliario (2004-2007-2009). En *Tecnologías de la información geográfica en el contexto del cambio global* (pp. 427–437). Madrid.
- Wang, C. K. y Philpot, W. D. (2007). Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 123–135. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.003>
- Wegener, A. (1920). *Die entstehung der kontinente und ozeane* (1ª ed.). Braunschweig: Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn. 231 pp.
- White, S. (2007). Utilization of LIDAR and NOAA's Vertical Datum Transformation Tool (VDatum) for Shoreline Delineation. In *Oceans 2007* (pp. 1–6). IEEE. <http://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449147>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. y Davis, I. (2004). *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters* (2ª ed.). London ; New York: Routledge. 471 pp.
- Yang, B., Kim, M. y Madden, M. (2013). Assessing optimal image fusion methods for Very High Spatial resolution satellite images to support coastal monitorin. *GIScience & Remote Sensing*, 49, 687–710.
- Zazo, C., Dabrio, C. J., Goy, J. L., Bardají, T., Ghaleb, B., Lario, J., Hoyos, M., Hillaire-Marcel, C.I., Sierro, F.J., Flores, J.A., Silva, P.G. y Borja, F. (1996). Cambios en la dinámica litoral y nivel del mar durante el Holoceno en el Sur de Iberia y Canarias Orientales. *Geogaceta*, 20(7), 1679–1682.
- Zazo, C., Dabrio, C. J., Goy, J. L., Lario, J., Cabrero, A., Silva, P. G., Bardají, T., Mercier, N., Borja, F. y Roquero, E. (2008). The coastal archives of the last 15 ka in the Atlantic-Mediterranean Spanish linkage area: Sea level and climate changes. *Quaternary International*, 181, 72–87.

Zhou, G. y Xie, M. (2009). Coastal 3-D morphological change analysis using LiDAR series data: a case study of Assateague Island National Seashore. *Journal of Coastal Research*, 252, 435–447. <http://doi.org/10.2112/07-0985.1>

PÁGINAS WEB DE REFERENCIA

Foot, K. . y Huebner, D. J. (1995). Error, Accuracy and Precision. *The Geographer's Graft Project*.

Extraído de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/error/error_f.html

Fecha de último acceso: 24 de octubre de 2016

Mangor, K. (2008). Definitions of coastal terms.

Extraído de http://www.coastalwiki.org/wiki/Definitions_of_coastal_terms.

Fecha de último acceso: 19 de julio de 2016

Morales, J. A. (2010). El impacto de la presa de Alqueva para el Guadiana. Extraído de <http://www.besana.es/es/web/revista/201004/el-impacto-de-la-presa-de-alqueva-para-el-guadiana>. Fecha de último acceso: 10 de octubre de 2016.

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía -IECA- (2016). Padrón Municipal de Habitantes. Cifras Oficiales de Población Municipal. Avance de los datos provisionales a 1 de enero de 2016. Extraído de

<http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/padron/index.htm>

Fecha de último acceso: 25 de marzo de 2016.

Red de Información Ambiental de Andalucía -REDIAM- (2016). Qué es y cómo se hace una ortofoto. Extraído de

http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.04dc44281e5d53cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=c6fd05464ea09110VgnVCM1000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=48f87d087270f210VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextfmt=rediam&lr=lang_es. Fecha de último acceso: 4 de noviembre de 2016.

PÁGINAS WEB DE IMÁGENES

Portada de Tesis. Extraído de www.campodegibraltarturismo.com. Fecha de último acceso: 22 de febrero de 2017.

Portada de Capítulo 1. Extraído de <http://huelvabuenasnoticias.com>. Fecha de último acceso: 21 de febrero de 2017.

Portada de Capítulo 2. Extraído de <https://es.pinterest.com/pin/525443481501746229/>. Fecha de último acceso: 22 de febrero de 2017.

Portada de Capítulo 3. Extraído de www.campodegibraltarturismo.com. Fecha de último acceso: 22 de febrero de 2017.

Portada de Capítulo 4. Extraído de <http://www.socialmedianode.com/gibraltar-aerea/>. Fecha de último acceso: 21 de febrero de 2017.

Portada de Capítulo 5. Extraído de <https://sierraysol.com/es/package/san-jose-cabogata/>. Fecha de último acceso: 22 de febrero de 2017.

Portada de Capítulo 6. Extraído de <https://slopeznapoleon.wordpress.com>. Fecha de último acceso: 21 de febrero de 2017.

Figura 1.7. Extraído de www.andaluciainformacion.es. Fecha de último acceso: 3 de marzo de 2016.

Figura 2.3. Extraído de www.beg.utexas.edu. Fecha de último acceso: 24 de enero de 2017.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Ámbito de estudio.	14
Figura 1.2. Principales Espacios Naturales Protegidos del Litoral Andaluz.	15
Figura 1.3. Izquierda: desembocadura del río Guadiana y playa de Isla Canela (Ayamonte). Derecha: Cala Cerrada (Pulpí).	17
Figura 1.4. Principales unidades geológicas de Andalucía.	18
Figura 1.5. Estadios isotópicos marinos durante el Cuaternario.	19
Figura 1.6. Ejemplos de infraestructuras del litoral andaluz. Izquierda: Puerto de Chipiona (Cádiz). Derecha: sistema de rompeolas en la Playa de Benaluquete, en Adra (Almería).	21
Figura 1.7. Formaciones destacadas de la vertiente atlántica andaluza.	22
Figura 1.8. Costas atlánticas andaluzas.	24
Figura 1.9. Formaciones destacadas de la vertiente mediterránea andaluza.	26
Figura 1.10. Costas mediterráneas andaluzas.	27
Figura 1.11. Tipología de playas andaluzas.	31
Figura 1.12. Playas expuestas y formaciones litorales en la vertiente atlántica.	32
Figura 1.13. Playas expuestas y formaciones litorales en el sector occidental de la vertiente mediterránea.	34
Figura 1.14. Playas expuestas y formaciones litorales en el sector oriental de la vertiente mediterránea.	35
Figura 1.15. Delimitación de Unidades Fisiográficas del litoral andaluz.	37
Figura 1.16. Delimitación de Tramos del litoral andaluz.	38

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Principales componentes geomorfológicos e hidrodinámicos de una playa.	42
Figura 2.2. Dinámica transversal de las playas.	47
Figura 2.3. Esquema de funcionamiento de la deriva litoral.	48
Figura 2.4. Deriva continental según la teoría de Wegener, 1920.	51
Figura 2.5. Estimaciones de subida del nivel medio del mar hasta 2100 según la aplicación de diversos escenarios.	56
Figura 2.6. Tasa de elevación anual (mm./año).	57
Figura 2.7. Puntos de análisis para la costa andaluza del régimen medio de altura de ola significativa media.	59
Figura 2.8. Comparación entre cartografía histórica (mapa topográfico del Estado Mayor del Ejército Alemán 1940-1944) y actual (ortofotografía digital en color de Andalucía 2010-2011) del delta del río Adra (Almería).	70
Figura 2.9. Balance sedimentario anual (2007-2008) en el conjunto de la zona emergida y sumergida en las playas de Maspalomas y El Inglés.	72

Figura 2.10. Estudio de erosión en la costa septentrional de Alaska durante el período (1955-2005) mediante el uso de teledetección.	75
Figura 2.11. Imagen realizada con datos del sensor LiDAR batimétrico “HawkEye II” para el delta submarino y sistema litoral asociado a la desembocadura del Guadiana.	77
Figura 2.12. Variación neta de la superficie de la playa de Sotavento en Fuerteventura mediante el uso de fotografías aéreas.	79
Figura 2.13. Niveles de interacción con el usuario en los procesos participativos.	88
Figura 2.14. Interfaz de la aplicación <i>North Carolina Coastal Erosion</i> .	90
Figura 2.15. Interfaz de la aplicación <i>Coastal Erosion</i> .	90
Figura 2.16. Interfaz de la aplicación <i>Maui Shoreline Study Erosion Maps</i> .	91
Figura 2.17. Interfaz de la <i>National Assessment of Shoreline Change Web Mapping Application</i> .	92
Figura 2.18. <i>Interfaz del Massachusetts Shoreline Change Browser</i> .	92
Figura 2.19. Interfaz de la aplicación IhCantabria.	93
Figura 2.20. Interfaz del Visor Cóndor.	96
Figura 2.21. Interfaz de <i>Global Climate Monitor</i> .	97
Figura 2.22. Interfaz del visor <i>Gis and Coast</i> .	98

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Esquema del proceso metodológico de la Tesis Doctoral.	106
Figura 3.2. Esquema de la composición de las películas en escala de grises (pancromático), color (RGB) e infrarrojo color (IRC).	108
Figura 3.3. Fotogramas originales escaneados procedentes del vuelo fotogramétrico de 1956.	109
Figura 3.4. De izquierda a derecha, captura de imágenes en pancromático, color (RGB) e infrarrojo cercano (IRC).	110
Figura 3.5. Proceso de generación de una ortofotografía digital.	113
Figura 3.6. Caracterización de los tramos de línea de costa según las fechas de vuelo de las ortofotografías utilizadas.	121
Figura 3.7. Tramos excluidos de las ortofotografías utilizadas para el levantamiento de líneas de costa.	122
Figura 3.8. Detalle del delta del Río Vélez (Vélez Málaga). A la izquierda: Mapa Topográfico del Estado Mayor del Ejército Alemán (1940-1944). A la derecha: Mapa Topográfico Nacional ráster (actualización de 2015).	125
Figura 3.9. Ejemplo de atributos alfanuméricos asociados a cada unidad geológica del Mapa Geológico Continuo de España en el Campo de Dalías (El Ejido, Almería).	126
Figura 3.10. Información multitemática asociada al tramo de Sancti Petri (Chiclana de la Frontera, Cádiz).	127

Figura 3.11. Fotografía aérea oblicua del Peñón de Salobreña y Playa de La Charca (Salobreña, Granada).	127
Figura 3.12. Fotografía a pie de campo de una playa de “bolos” sobre formaciones flyshoides en Punta Guadalmesí (Tarifa, Cádiz).	128
Figura 3.13. Tipos de indicador de posición de línea de costa.	130
Figura 3.14. Criterios de digitalización de la línea de costa.	131
Figura 3.15. Ejemplo de digitalización generalizada en entrantes costeros en Costa Ballena (Rota, Cádiz).	132
Figura 3.16. Corrección de deformación geométrica en un fotograma de 1956 correspondiente al delta del Río Guadalfeo (municipios de Salobreña y Motril, Granada).	138
Figura 3.17. Izquierda: digitalización con línea recta en elementos antrópicos. Derecha: digitalización con línea tangente en contactos naturales.	139
Figura 3.18. Uso de dominios individuales para cada campo de la base de datos de línea de costa.	140
Figura 3.19. Reglas topológicas aplicadas en el control de calidad final de los datos.	141
Figura 3.20. Verificación de tablas de cumplimentación obligatoria y chequeo de concordancia lógica para un tramo costero acantilado.	142
Figura 3.21. Modelo de datos original de la línea de costa de 2009.	144
Figura 3.22. Modelo de datos final de las líneas de costa para cada fecha de estudio.	146
Figura 3.23. Esquema de la tipología jerárquica de la línea de costa (4 niveles).	147
Figura 3.24. Corrección manual de transectos para garantizar su ortogonalidad a la costa.	150
Figura 3.25. Metodología de cálculo de la herramienta <i>DSAS</i> .	150
Figura 3.26. Criterios para la delimitación de la playa útil de 2011	154
Figura 3.27. Intersección entre la capa poligonal de “playa útil” y transectos para obtener la anchura y el área estimada de la misma.	155
Figura 3.28. Diferencia entre los conceptos de líneas de costa larga (izquierda) y corta (derecha) en El Puerto de Santa María (Cádiz).	156
Figura 3.29. Variables intervinientes en el indicador de sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico.	158
Figura 3.30. Integración de resultados en el modelo de datos a través de la entidad de transectos.	160
Figura 3.31. Representación de las tasas para el período 1977-2011 en la playa de San Miguel en El Ejido (Almería).	162
Figura 3.32. Representación de resultados en 4 entidades puntuales.	163
Figura 3.33. Comparación visual a escala media entre tasas generalizadas y originales.	164
Figura 3.34. Esquema del proceso metodológico de la Tesis Doctoral (II).	165
Figura 3.35. Funcionamiento y funcionalidades del prototipo del visor generalista.	168
Figura 3.36. Interfaz del prototipo del visor <i>GIS and Coast</i> .	169

Figura 3.37. Funcionalidades y herramientas de participación bidireccional y multidireccional en el visor <i>GIS and Coast</i> .	170
Figura 3.38. Interfaz de la herramienta para especialistas.	172
Figura 3.39. Funcionamiento y funcionalidades del prototipo de la herramienta para especialistas.	172
Figura 3.40. Funcionalidades de utilizadas para el usuario especializado.	174

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Esquema del modelo de datos final.	176
Figura 4.2. Segmento de línea de costa de 2011 según el <i>proxy backshore/foredune</i> en la desembocadura del río Andarax (Almería).	177
Figura 4.3. Resultado del modelo de datos de línea de costa.	180
Figura 4.4. Resultado del modelo de datos del cálculo de tasas y representación.	183
Figura 4.5. Delimitación de los Tramos de estudio para la costa andaluza.	188
Figura 4.6. Transectos con tasas positivas y negativas para el período de referencia 1977-2011.	193
Figura 4.7. Estadísticos por fenómeno acumulativo/erosivo realizado sobre el período de referencia 1977-2011.	194
Figura 4.8. Comparación de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos históricos 1956-1977 y 1956-2011.	196
Figura 4.9. Gráfico comparativo de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos históricos 1956-1977 y 1956-2011.	197
Figura 4.10. Comparación de estadísticos por fenómeno acumulativo/erosivo realizado sobre el período de referencia 1977-2011 y los períodos históricos 1956-1977 y 1956-2011.	199
Figura 4.11. Comparación de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos recientes 1977-2001 y 2001-2011.	201
Figura 4.12. Gráfico comparativo de tasas de erosión entre el período de referencia 1977-2011 y períodos recientes 1977-2001 y 2001-2011.	202
Figura 4.13. Comparación de estadísticos por fenómeno acumulativo/erosivo realizado sobre el período de referencia 1977-2011 y los períodos recientes 1977-2001 y 2001-2011.	204
Figura 4.14. Límites, evolución geomorfológica y balance sedimentario en el Tramo 1 (río Guadiana-puerto de Chipiona).	209
Figura 4.15. Alteraciones de la cuenca vertiente y frente litoral.	210
Figura 4.16. Sectores identificados en el Tramo río Guadiana-puerto de Chipiona para la interpretación de las tasas de erosión.	214
Figura 4.17. Tasas de erosión históricas para los sectores A, B y C del Tramo 1.	220
Figura 4.18. Tasas de erosión históricas para los sectores D y E del Tramo 1.	222
Figura 4.19. Tasas de erosión recientes para los sectores A, B y C del Tramo 1.	227

Figura 4.20. Tasas de erosión recientes para los sectores D y E del Tramo 1.	229
Figura 4.21. Límites, evolución geomorfológica y balance sedimentario en el Tramo 5 (Castell de Ferro-Cabo de Gata).	234
Figura 4.22. Alteraciones de la cuenca vertiente y frente litoral.	235
Figura 4.23. Sectores identificados en el Tramo Castell de Ferro-Cabo de Gata para la interpretación de las tasas de erosión.	239
Figura 4.24. Tasas de erosión históricas para los sectores A, B y C del Tramo 5.	246
Figura 4.25. Tasas de erosión históricas para los sectores D y E del Tramo 5.	249
Figura 4.26. Tasas de erosión recientes para los sectores A, B y C del Tramo 5.	254
Figura 4.27. Tasas de erosión recientes para los sectores D y E del Tramo 5.	256
Figura 4.28. Cálculo de la playa útil poligonal (área entre <i>proxies</i>) y de distancias lineales (anchura).	257
Figura 4.29. Conceptos de líneas de costa. Imagen superior: línea de costa larga. Imagen inferior: línea de costa corta.	258
Figura 4.30. Porcentaje de tipología del frente costero por municipio en la provincia de Almería.	260
Figura 4.31. Porcentaje de playas con alteraciones antrópicas por infraestructuras por municipio.	260
Figura 4.32. Longitud de playa (lineal y porcentual) por municipio.	261
Figura 4.33. Porcentaje de frente costero protegido por municipio.	261
Figura 4.34. Representación de los mayores y menores valores de sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico.	264
Figura 4.35. Representación del indicador de sensibilidad a la pérdida de las playas andaluzas como recurso turístico y las variables explicativas.	265
Figura 4.36. Visualización de los servicios interoperables generados mediante el software ArcGis®.	267
Figura 4.37. Interfaz del geovisor "Erosion_Tesis_Doctoral".	275
Figura 4.38. Representación de las tasas de erosión para varios períodos en ambos <i>proxies</i> .	276
Figura 4.39. Representación de los tres <i>proxies</i> (<i>foredune/backshore</i> , marca húmeda y anchura playa) para un único período (1977-2011).	276
Figura 4.40. Pestaña de despliegue de los proyectos generados.	277
Figura 4.41. Representación de los 3 <i>proxies</i> (<i>foredune/backshore</i> , marca húmeda y anchura de playa) en la ventana de la izquierda y acceso a <i>Street View</i> en la derecha.	278
Figura 4.42. Interfaz de la herramienta para especialistas.	279
Figura 4.43. Representación en la herramienta para especialistas de las tasas de erosión 1956-2011 para tramos que poseen dunas costeras.	279
Figura 4.44. Representación de los puntos de la costa con comportamiento erosivo histórico.	280

Figura 4.45. Gráficos y estadísticos calculados y actualizables en tiempo real. Puntos erosivos para todos los períodos.	280
Figura 4.46. Gráficos y estadísticos calculados y actualizables en tiempo real. Tasas para el período de referencia (1977-2011).	281

CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Porcentaje de tramos y distancia lineal de costa afectada por cada fenómeno para cada período.	289
Figura 5.2. Superficie acumulada y oscilación media de la línea de costa para cada período.	290
Figura 5.3. Porcentaje de tramos según su comportamiento evolutivo con influencia de errores y presencia de infraestructuras.	292
Figura 5.4. Porcentaje de transectos afectados por cada fenómeno para los Tramos 1 y 5.	294
Figura 5.5. Tasas de erosión del Tramo 1 para los períodos de estudio 1977-2011, 1956-1977 y 2001-2011.	296
Figura 5.6. Tasas de erosión del Tramo 5 para los períodos de estudio 1977-2011, 1956-1977 y 2001-2011.	297

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1. Estructura y contenido básico de la Tesis Doctoral.	12
Tabla 1.2. Longitud y porcentajes globales de líneas de costa larga y corta por tipología morfológica para la costa de 2011.	30

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Cálculos, con datos observados, de la subida del nivel del mar desde 1900.	55
Tabla 2.2. Estimación de subida de nivel medio del mar hasta 2100 según la aplicación de diversos escenarios.	56
Tabla 2.3. Datos sobre nivel del mar procedentes de los mareógrafos andaluces y periféricos.	58
Tabla 2.4. Fuentes de datos para el análisis de la erosión en playas y sus principales inconvenientes.	69
Tabla 2.5. Visores de erosión analizados. Contenidos, funcionalidades y nivel de interacción con el usuario.	94

CAPÍTULO 3

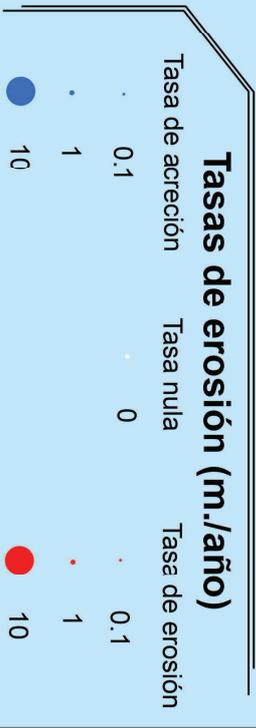
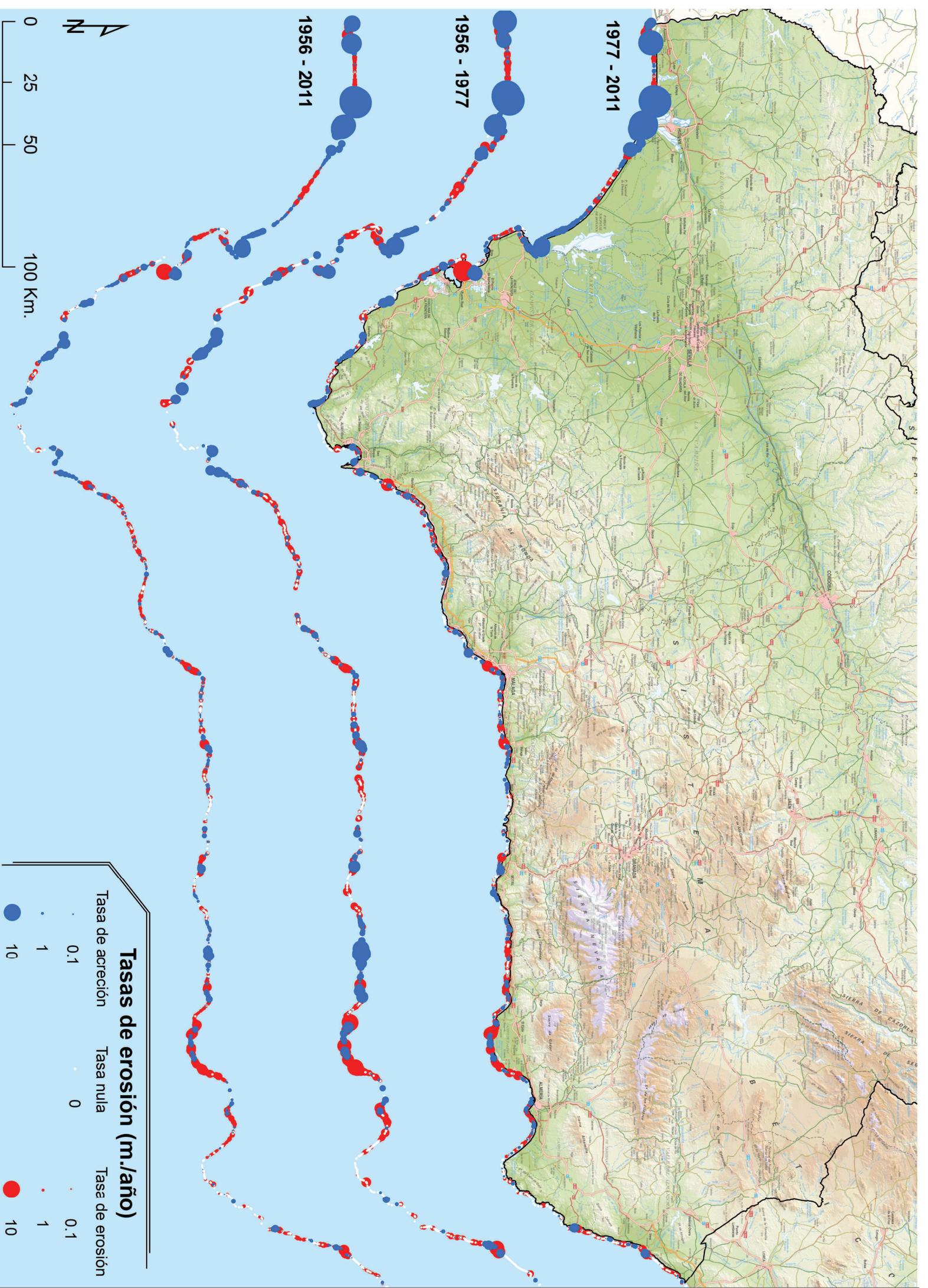
Tabla 3.1. Características y tratamientos aplicados a cada producto de un vuelo fotogramétrico.	114
Tabla 3.2. Vuelos fotogramétricos utilizados y características de sus productos derivados.	124
Tabla 3.3. Errores cuadráticos y potenciales de cada ortofotografía.	136
Tabla 3.4. Errores cuadráticos y potenciales de cada período de estudio.	136

CAPÍTULO 4

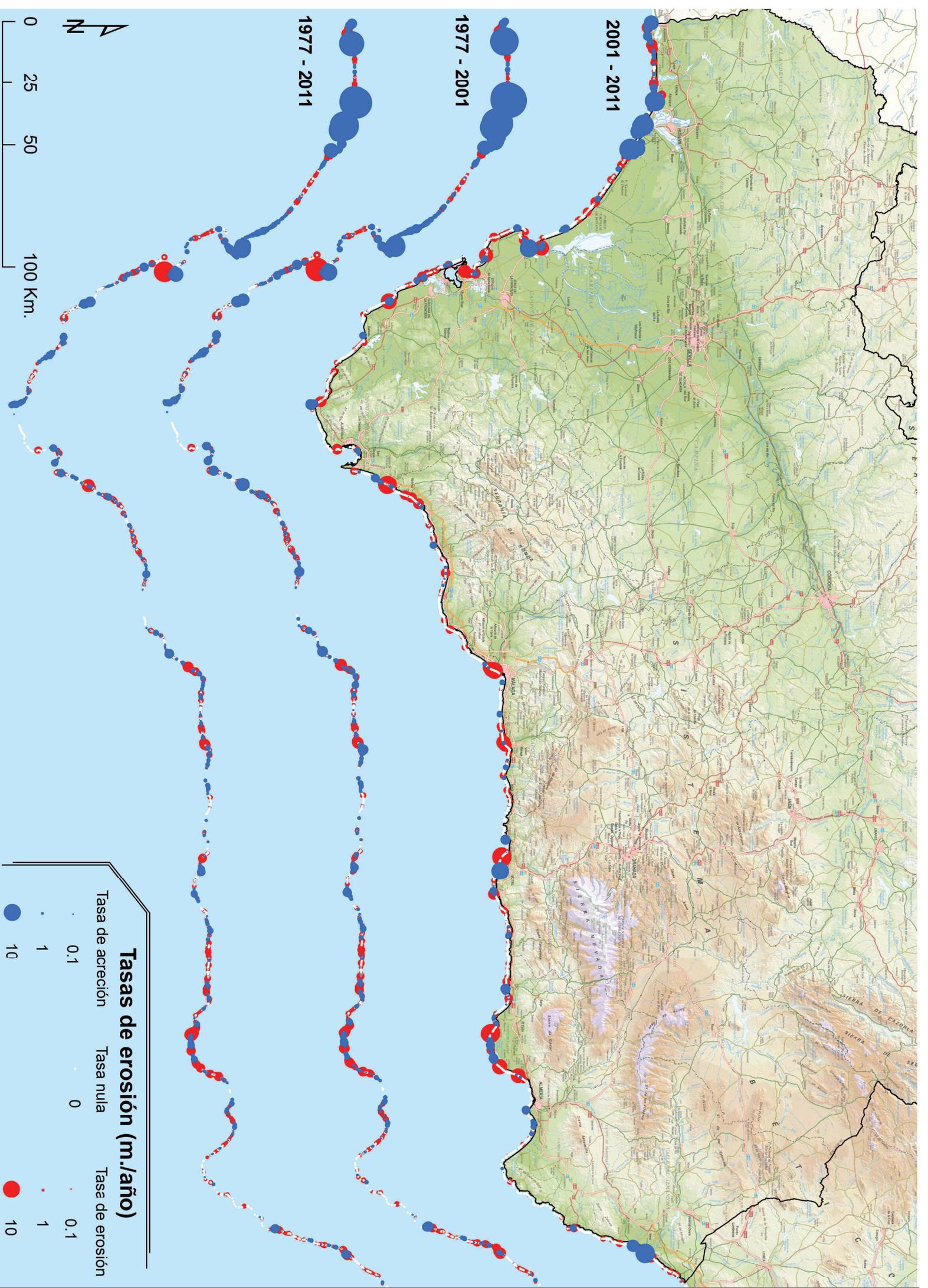
Tabla 4.1. Número de segmentos de línea de costa corta para ambos <i>proxies</i> de cada fecha de estudio.	178
Tabla 4.2. Principales características e inconvenientes de las fuentes de datos utilizadas para el Tramo 1.	217
Tabla 4.3. Principales características e inconvenientes de las fuentes de datos utilizadas para el Tramo 5.	242

Tabla 4.4. Distancias y porcentajes globales de líneas de costa larga y corta por tipología.	259
Tabla 4.5. Lista de servicios interoperables generados durante los procesos de cálculo interpretación y digitalización.	268
Tabla 4.6. Servicios interoperables vinculados a los resultados de las tasas de erosión.	270
Tabla 4.7. Servicios interoperables vinculados a los resultados de evolución de la playa útil.	271
Tabla 4.8. Servicios interoperables vinculados a los resultados de evolución de la playa útil poligonal e indicadores de interés para la Administración e indicador de sensibilidad.	272
Tabla 4.9. Servicios interoperables vinculados al índice de sensibilidad de playas.	273

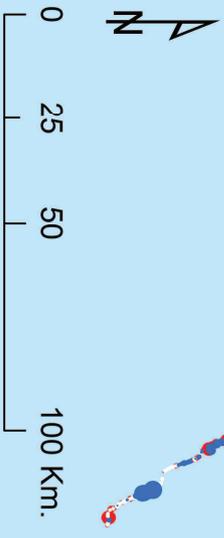
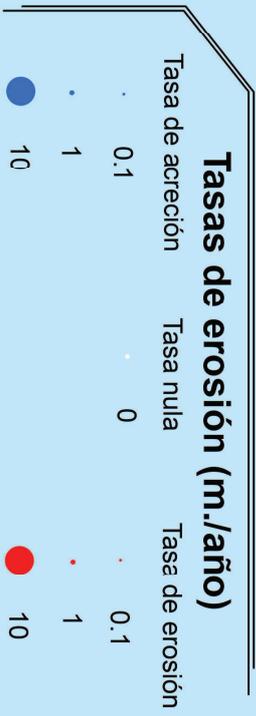
ANEXOS CARTOGRÁFICOS

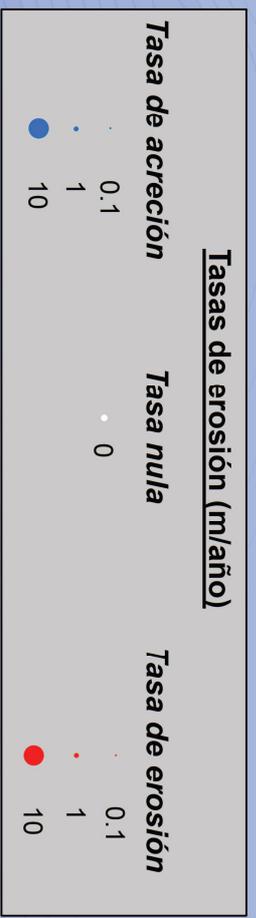
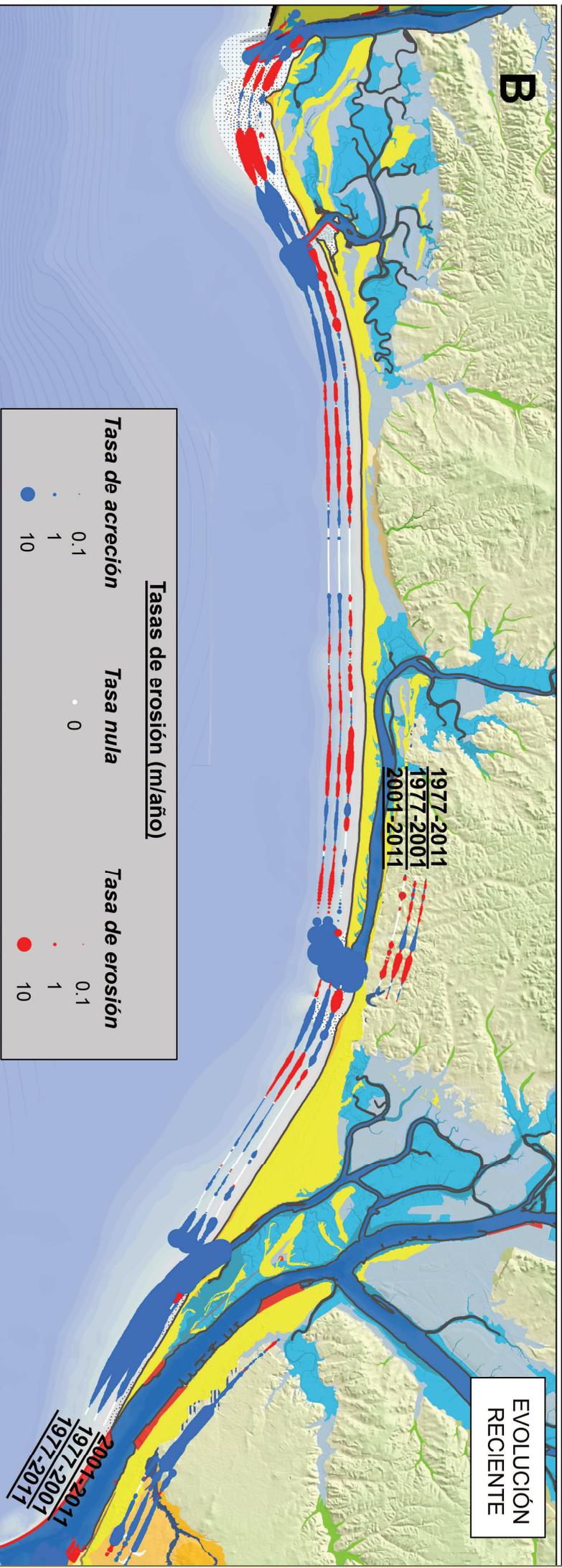
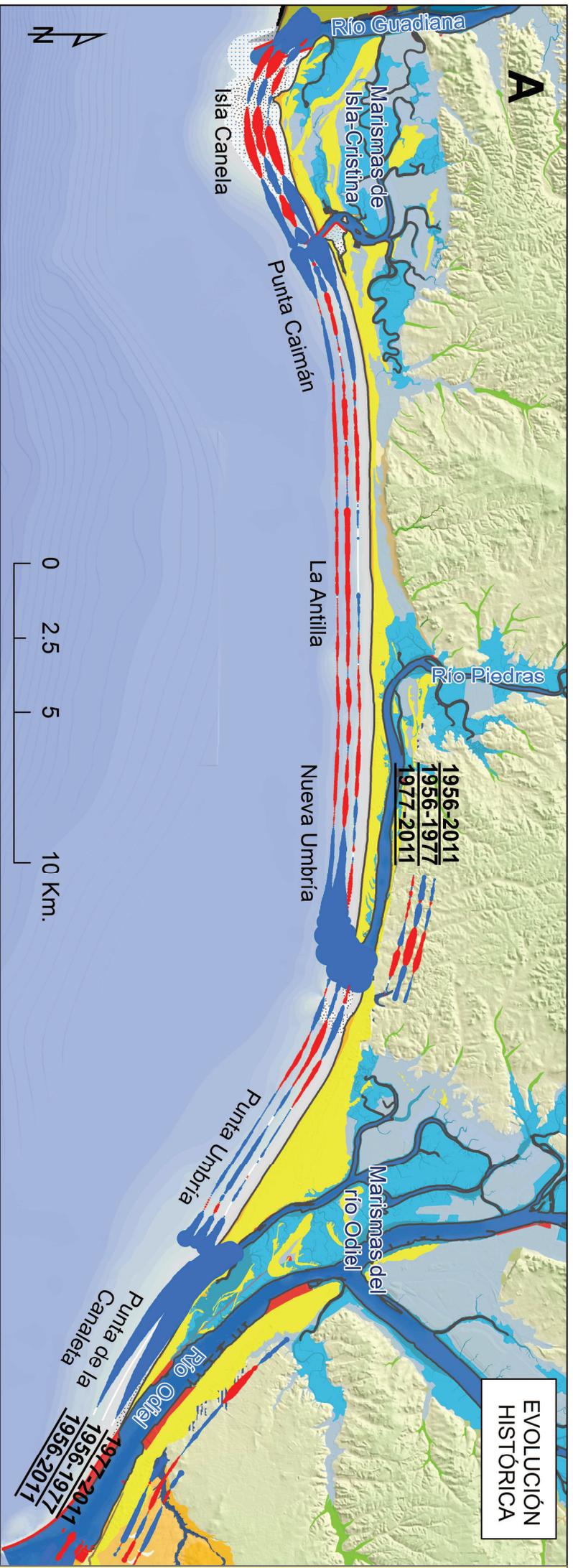


ANEXO 1. TASAS DE EROSIÓN: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS PLAYAS EXPUESTAS DE ANDALUCÍA



ANEXO 2. TASAS DE EROSIÓN: EVOLUCIÓN RECIENTE DE LAS PLAYAS EXPUESTAS DE ANDALUCÍA



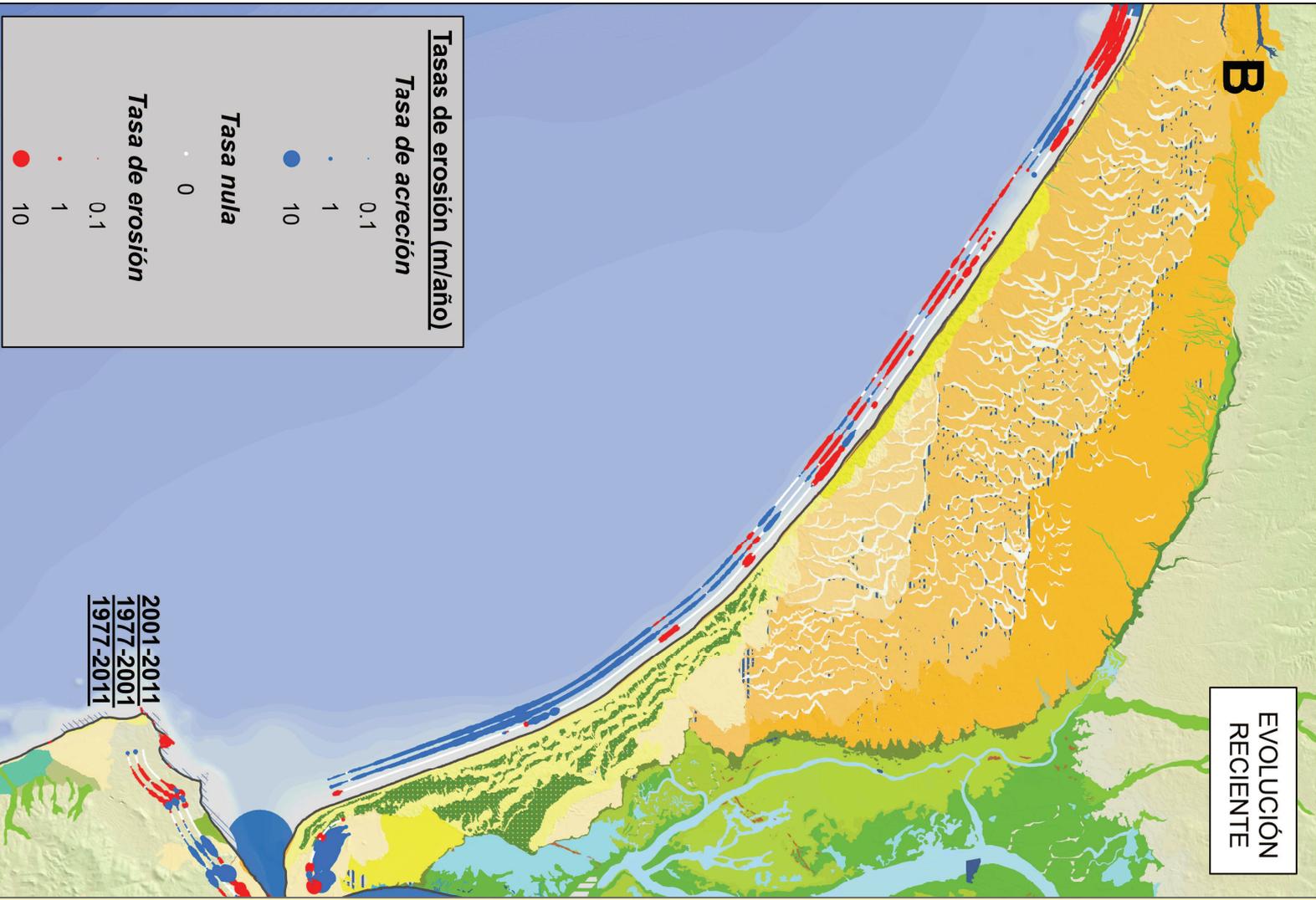


EVOLUCIÓN RECIENTE

EVOLUCIÓN HISTÓRICA

A

B



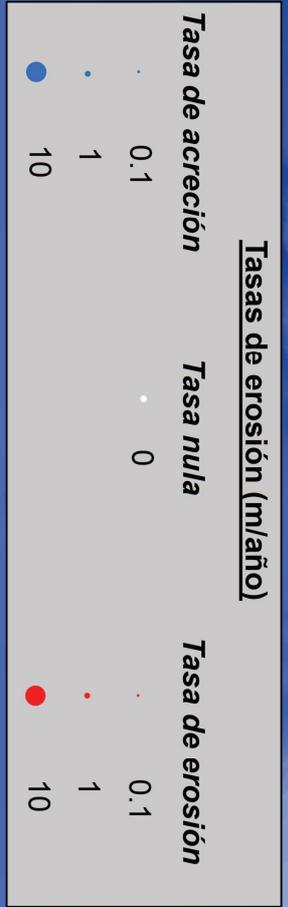
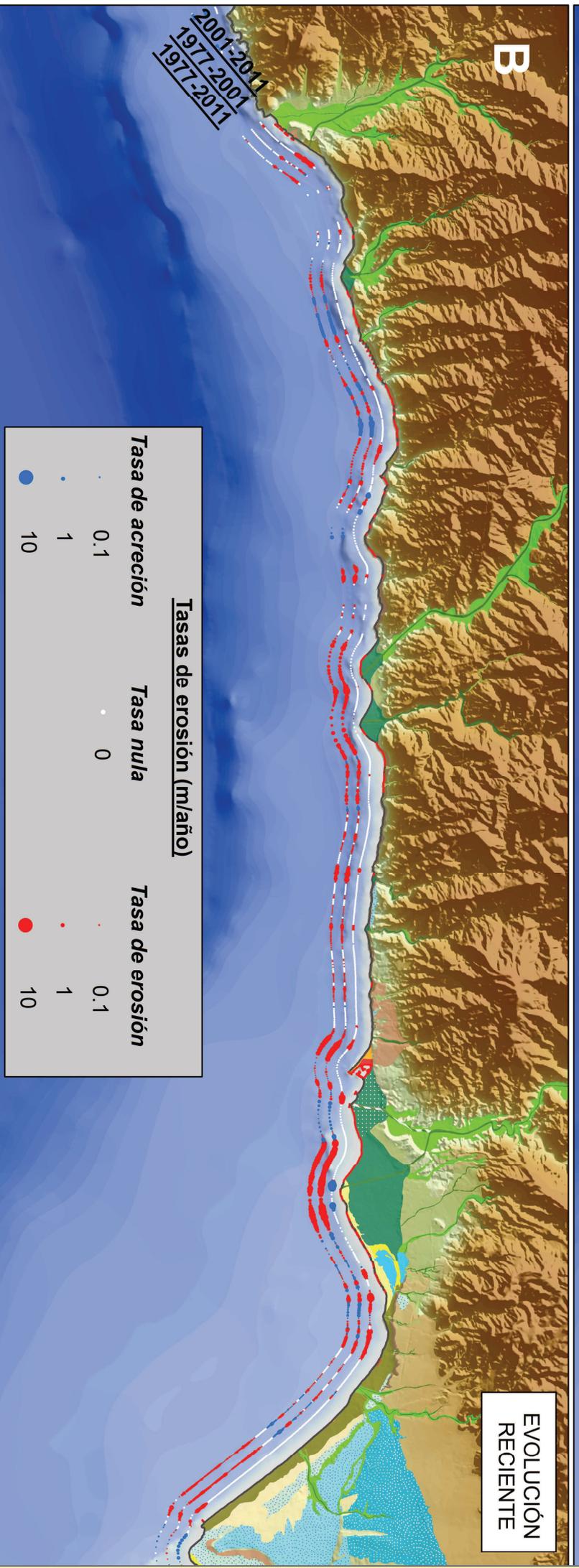
Tasas de erosión (m/año)

Tasa de acreción

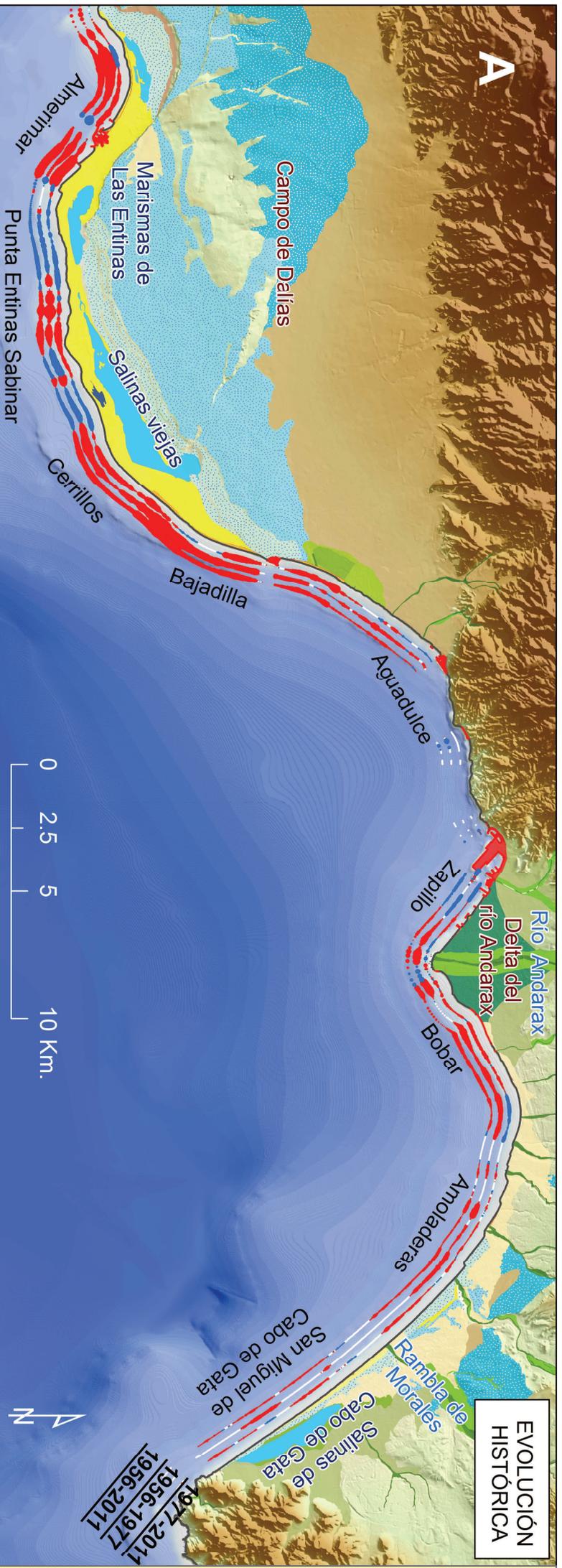
- 0.1
 - 1
 - 10
- Tasa nula**
- 0
- Tasa de erosión**
- 0.1
 - 1
 - 10

2001-2011
1977-2001
1977-2011

1977-2011
1956-1977
1956-2011

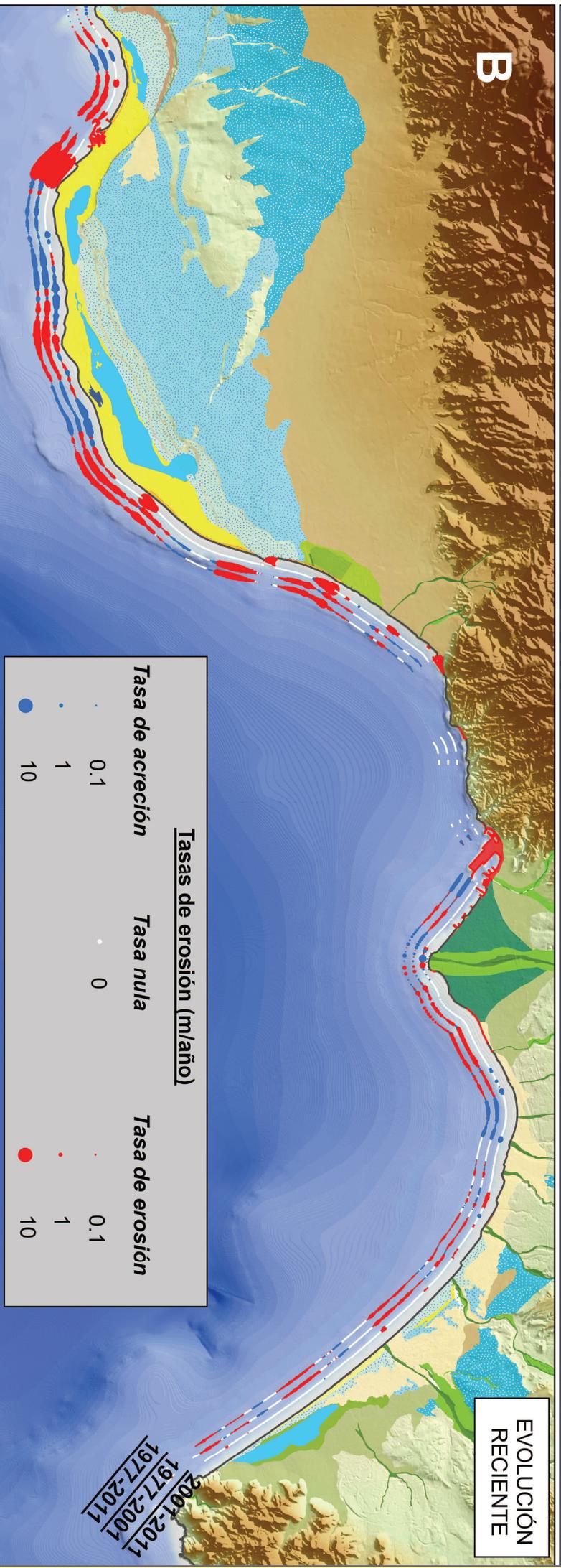


ANEXO 5. TASAS DE EROSIÓN: EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y RECIENTE DE LOS SECTORES A, B Y C DEL TRAMO 5



EVOLUCIÓN HISTÓRICA

1956-1977
1977-2011
2001-2011

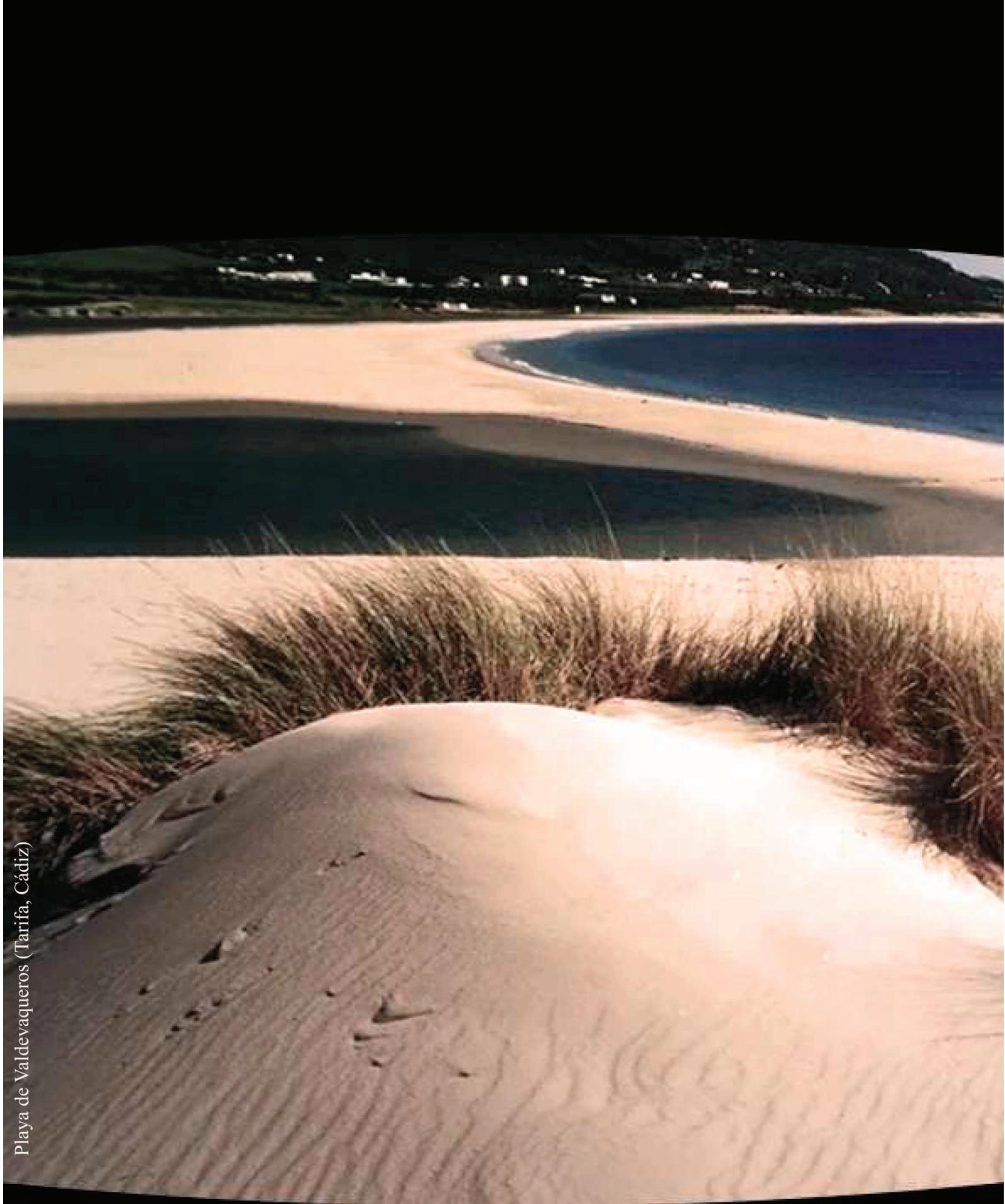


EVOLUCIÓN RECIENTE

2001-2011
1977-2001
1977-2011

Tasas de erosión (m/año)		Tasa nula		Tasa de erosión	
Tasa de acreción	0.1	0	0.1	0.1	0.1
	1			1	1
	10			10	10

ANEXO 6. TASAS DE EROSIÓN Y RECIENTE Y RECIENTE DE LOS SECTORES D Y E DEL TRAMO 5



Playa de Valdevaqueros (Tarifa, Cádiz)

Sevilla, abril de 2017