### INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS GEOESPACIALES COMO BASE PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DEL LITORAL

Fernando J. Aguilar Torres y Manuel Á. Aguilar Torres Profesores Titulares de la Universidad de Almería. Departamento de Ingeniería Rural Grupo de Investigación RNM-368 Gestión Integrada del Territorio y Tecnologías de la Información Espacial

Sumario: I. Introducción. II. Fuentes de información geo-referenciada para el seguimiento de la evolución de la línea de costa. 1. Generalidades. 2. Fotografías aéreas. 3. Modelos digitales de elevaciones. 4. Teledetección: tratamiento de imágenes digitales. 5. Sensores LiDAR. III. Propuesta metodológica para el monitoreo de costas. Métodos y aplicaciones. 1. Objetivos. 2. Zona piloto. 3. Fase I: Aplicación, integración y desarrollo de técnicas geomáticas para el estudio de la evolución de la línea de costa y la franja litoral. 4. Fase II: Detección automática y eficiente de zonas impermeables, edifícios e infraestructuras en entornos costeros a partir de datos georreferenciados multitemporales y multifuente. 5. Fase III: Introducción del análisis exploratorio de datos para el modelado de la influencia del crecimiento urbano litoral en los procesos de erosión y/o acreción costera. 6. Fase IV: Modelado y obtención de mapas de riesgo de inundación en una zona costera ante diferentes escenarios o condiciones de contorno. 6.1. Introducción. 6.2. Construcción del modelo de simulación. 6.3. Outputs obtenidos a partir de la consecución de la cuarta y última fase de la propuesta metodológica descrita. IV. Conclusiones.

#### I. INTRODUCCIÓN.

Estudios realizados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) señalan que la región del Mediterráneo, sobre todo las zonas clasificadas como áridas o semiáridas, son las que más problemas sufrirán como consecuencia de las variaciones del clima. Entre los cambios que se prevén podemos destacar la disminución de las precipitaciones, temperaturas más extremas, retraimiento de la línea de costa por elevación del nivel del mar (Fig. 1), etc. A este desesperanzador escenario hay que añadir la presión constante que sobre el litoral ejerce el hombre, más perniciosa y preocupante en la actualidad que el propio cambio climático, aunque más desconocida y, desde luego, con un menor impacto mediático. En efecto, más de la mitad de la población mundial vive a menos de 60 Km. de la línea de costa, lo que significa una

densidad de población a veces inadmisible para este tipo de ecosistemas altamente vulnerables. La Naturaleza ha mantenido durante miles de años un complejo equilibrio dinámico entre el mar y la tierra, equilibrio que está siendo alterado por el hombre y su ancestral sentido estático de dicho equilibrio.



Fig. 1. Mapa de inundaciones de una zona de la costa de Almería ante dos hipotéticos escenarios de incremento de nivel del mar (SLR: "Sea Level Rise") como consecuencia del cambio climático. Arriba tenemos SLR = + 4 m. y abajo SLR = + 1 m.

La costa de la provincia de Almería no se ha librado de las perturbaciones antrópicas. Asistimos a un constante sellado artificial del suelo producido por la proliferación de urbanizaciones e infraestructuras costeras (Fig. 2), cuyo efecto cuantitativo sobre la evolución de la línea de costa es, a menudo, desconocido. Los procesos de sellado o impermeabilización del suelo de la franja costera producen la rotura del equilibrio sedimentario al sustituir arenales costeros por edificaciones y disminuir el aporte de sedimentos al mar. Por otra parte, durante los años 60-90 se extrajeron del orden de 20 millones de m<sup>3</sup> de arena de las playas para ser usada en los invernaderos.



Fig. 2. Presión antrópica sobre la línea de costa debido, entre otros motivos, a la proliferación no planificada de urbanizaciones e infraestructuras litorales.

Ante esta preocupante situación parece obvia la necesidad de implementar sistemas eficaces de seguimiento ("monitoring") de los efectos producidos por este tipo de actuaciones sobre nuestro litoral<sup>1</sup>. Las técnicas emergentes de fusión y análisis de datos multi-temporales que ofrecen la moderna Ingeniería Geomática y el procesamiento de imágenes digitales (fotogrametría digital e imágenes de satélite de alta resolución, láser aerotransportado, segmentación y clasificación automática de imágenes, modelos digitales de elevaciones, etc.) permiten el desarrollo de metodologías rápidas y precisas para la obtención de modelos 3D del terreno y de las infraestructuras y vegetación que se sustentan sobre él (Modelos Digitales de Elevaciones y de Superficies respectivamente). A partir de dichos productos, y de otros como ortofotografías y cartografía digital vectorial, puede modelarse la evolución

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La metodología expuesta en este capítulo está siendo desarrollada en el Proyecto de Excelencia P08-RNM-03575 (2009-2012) financiado por la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía, denominado "Integración y análisis exploratorio de datos geoespaciales multifuente para el seguimiento y modelado de la evolución y vulnerabilidad de áreas costeras. Aplicación a una zona del Levante de Almería". Los autores de este capítulo desean expresar su más sincero agradecimiento por ello.

temporal de la línea costera y la dinámica de la erosión-acreción en la franja litoral. Dicha evolución puede relacionarse mediante técnicas de estadística espacial con la dinámica de sellado del terreno debido a la proliferación de urbanizaciones e infraestructuras costeras detectadas y cartografiadas de forma automática a partir de imágenes aéreas y nubes de puntos láser.

En definitiva, podemos desarrollar la tecnología necesaria para conocer lo que está ocurriendo a nuestras costas. Sólo necesitamos implementar estos sistemas de monitoreo como una metodología continua de soporte a la toma de decisiones dentro de una política de Gestión Integrada de Áreas Costeras (GIAC), tal y como establece el marco del Convenio para la Protección del Medio Marino y de la Zona Costera del Mediterráneo, denominado Convenio de Barcelona.

### II. FUENTES DE INFORMACIÓN GEO-REFERENCIADA PARA EL SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA.

#### 1. Generalidades.

El medio costero constituye uno de los ambientes naturales más dinámicos y cambiantes de la superficie terrestre<sup>2</sup>. Este aspecto, unido a la creciente ocupación humana de los litorales para diferentes usos, ha llevado en las últimas décadas a un rápido desarrollo de técnicas que permitan predecir a corto y medio plazo el comportamiento de la línea de costa. El estudio de la evolución costera a medio-largo plazo necesita habitualmente de documentos de referencia cuya comparación permita establecer tendencias. Entre los datos y fuentes de información, comúnmente utilizados en estudios de evolución de las zonas del litoral y de la línea de costa, se encuentran:

- La cartografía, fundamentalmente compuesta por mapas y cartas náuticas de fiabilidad a menudo limitada.
- (ii) Fotografías aéreas, que constituyen el documento más utilizado para el cálculo de tasas de erosión/acreción, mediante el uso de técnicas

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> WOODROFFE, C.D., 2002. Coasts: form, process and evolution. Cambridge University Press, Cambridge.

fotogramétricas<sup>3,4,5</sup>. El uso de fotografías aéreas multitemporales permite comparar cuantitativamente la evolución de la línea de costa en diferentes puntos, lo que aporta datos no sólo para establecer tendencias numéricas de avance/retroceso, sino también para medir procesos de refracción/difracción del oleaje, estimar direcciones de trasvase sedimentario, o evaluar las consecuencias de las actuaciones humanas sobre el litoral<sup>6</sup>.

- (iii) La teledetección espacial ofreció un elevado volumen de datos sobre las zonas costeras desde sus inicios (años 50-60) con una elevada periodicidad, si bien su utilización para los cálculos de tasas de erosión está limitada por su resolución espacial. Con el lanzamiento de satélites de alta resolución como IKONOS y QuickBird, en 1999 y 2001 respectivamente, las imágenes de satélite comienzan a competir con la fotografía aérea<sup>7,8</sup>.
- (iv) Los levantamientos topográficos son técnicas utilizadas para realizar estudios sobre cambios de la línea de costa a gran escala de detalle. Inicialmente se realizaban con estación total mediante perfiles transversales a la costa, aunque el coste en tiempo y dinero hacían este sistema prohibitivo. Durante los últimos años la aparición de las nuevas tecnologías basadas en Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) ha abaratado sustancialmente los costes.
- (v) Altimetría Láser Aerotransportada (ALS). La combinación de un equipo aéreo equipado con GPS y sistema de navegación inercial junto a un altímetro láser de barrido (LIDAR), proporciona directamente modelos

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> BAILY, B., NOWELL, D., 1996, Techniques for monitoring coastal change; a review and case study. *Ocean and Coastal Management*, 32, 85-95.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> JIMÉNEZ, J.A., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., BOU, J., ORTIZ, M., 1997, Analysing short-term shoreline changes along the Ebro delta (Spain) using aerial photographs. *Journal of Coastal Research*, 13, 1256-1266.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> OJEDA, J., 2000, Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. Boletín de la Asociación de Geógrafos de España, 30, 103-118.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> DOLAN, R., HAYDEN, B.P., MAY, P., MAY, S., 1980, The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. Shore and Beach, 48, 22-29.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> DI, K., MA, R., LI, R., 2003, Geometric processing of Ikonos stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(8), 873-879.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> AGUILAR, M.A., AGUILAR, F.J., AGÜERA, F., SÁNCHEZ, J.A., 2007, Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12), 1321-1332.

digitales del elevaciones (MDE) de una elevada precisión altimétrica (en torno a 15 cm.) y resolución espacial de hasta orden submétrico (un punto cada 25 cm. o incluso superior). Su limitación es que, debido a su relativa juventud, no existen registros históricos de datos LIDAR, por lo que son técnicas de aplicación en cambios muy recientes y, sobre todo, en el seguimiento de la evolución futura para lo que constituyen, sin duda, la mejor opción tecnológica. Varios estudios han demostrado el alto potencial de esta tecnología emergente en la detección cuantitativa de cambios en el terreno y en la posibilidad de la integración con datos derivados de fotogrametría digital<sup>9,10</sup>.

#### 2. Fotografías aéreas.

Las fotografías aéreas, y concretamente las series temporales de las mismas, suele ser la información de base utilizada con mayor frecuencia en los estudios de análisis de los procesos de cambio en el territorio<sup>11</sup>. Concretamente, en el territorio español se han llevado a cabo numerosos estudios que utilizan series temporales de fotografías históricas para estudiar la evolución costera (erosión/acreción) en los últimos 50 años en costas del litoral catalán<sup>12</sup>, en la desembocadura del río Vélez en Málaga<sup>13</sup>, en las playas de Sotavento de

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> ADAMS, J.C., CHANDLER, J.H., 2002, Evaluation of lidar and medium scale photogrammetry for detecting soft-cliff coastal change. *The Photogrammetric Record*, 17(99), 405-418.

MILLS, J.P., BUCKLEY, S.J., MITCHELL, H.L., CLARKE, P.J., EDWARDS, S.J., 2005, A geomatics data integration technique for coastal change monitoring. Earth Surface Processes and *Landforms*, 30, 651-664. <sup>11</sup> ZHENG, D., WALLIN, D.O., HAO, Z., 1997, Rates and patterns of landscape change between 1972

and 1988. in the Changbai Mountain area of China and North Korea. Landscape Ecology, 12, 241-254.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> CROUS, A., PINTÓ, J., 2006, Evolución de la playa de Sa Riera (Cap de Begur, Costa Brava) en los últimos 50 años. Investigaciones geográficas, 39, 119-130.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> SENCIALES, J.M., MALVÁREZ, G., 2003, La desembocadura del río Vélez (Provincia de Málaga, España). Evolución reciente de un delta de comportamiento mediterráneo. Rev. C. & G., 17(1-2), 47-61.

Fuerteventura<sup>14</sup>, en la costa entre Sanlúcar de Barrameda y Rota<sup>15</sup> o en la costa de Almería entre las playas de la ciudad de Almería y Retamar<sup>16</sup>.

La mayoría de estos trabajos utilizan como vuelo fotogramétrico más antiguo el conocido como Vuelo Americano de 1956-57, cuyos positivos son suministrados por el Centro Cartográfico y Fotográfico (CECAF) del Servicio Geográfico del Ejército. Dicho vuelo fue realizado por el servicio cartográfico del ejército de los Estados Unidos y es el primero que cubrió la totalidad del territorio español. El principal problema de este vuelo fotogramétrico es la carencia de certificado de calibración de la cámara, y la no existencia de marcas fiduciales utilizables por las modernas Estaciones Fotogramétricas Digitales.

Otro problema general que se encuentra al restituir un vuelo fotogramétrico histórico es la dificultad para encontrar puntos de control adecuados, tanto por su número como por la distribución de los mismos<sup>17</sup>.

#### 3. Modelos Digitales de Elevaciones.

Por definición, la línea de costa es la línea de contacto entre la tierra y el agua, algo muy fácil de definir pero muy difícil de capturar o medir, debido a que el nivel del mar está cambiando permanentemente. Este hecho provoca que, independientemente del error asociado al tratamiento fotogramétrico digital de las fotografías aéreas (*i.e.* escala de vuelo, precisión y distribución de puntos de control, resolución de los fotogramas escaneados, calidad del escáner fotogramétrico empleado y relación base/altura de los fotogramas), sea la falta de definición del nivel del mar el elemento que influye de manera fundamental

 <sup>&</sup>lt;sup>14</sup> ALONSO, I, CABRERA, L.L., JIMÉNEZ, J.A, VALDEMORO, H.I., SÁNCHEZ, I, 2007, Aplicación de la fotogrametría a estudios de erosión costera. In *Actas del XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mar del Plata, Argentina*, 2007.
 <sup>15</sup> DOMÍNGUEZ, L., GRACIA, F.J., ANFUSO, G., 2004, Tasas de avance/retroceso de la línea de costa

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> DOMINGUEZ, L., GRACIA, F.J., 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). *Rev. Soc. Geol. España*, 17 (1-2): 71-86.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> MANZANO, G., MUÑOZ, A., 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. In XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Actas del Congreso, Zaragoza-Huesca España.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> ZANUTTA, A., BALDI, P., BITELLI, G., CARDINALI, M., CARRARA, A., 2006, Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. Annals *of Geophysics*, 49(4/5), 1067-1080.

en los errores cometidos en la delineación de la línea de costa, pudiendo superar en playas mediterráneas con pequeña pendiente los 21 m.

En este sentido, un informe de la Comisión Europea del año 2004 estimaba que alrededor de una quinta parte del litoral de la Unión Europea sufrió un proceso de regresión de entre 0.5 y 2 m. por año entre 2002 y 2004. Estos valores de regresión anual son casi despreciables si los comparamos con el error ocasionado por la incertidumbre de la posición del nivel del mar, circunstancia que hace que muchos investigadores incorporen procedimientos altimétricos como los Modelos Digitales de Elevaciones (MDEs) para definir con menor error la línea de costa<sup>9,10</sup>. Un MDE no es otra cosa que una representación digital del terreno que sustituye, en cierto modo, a los planos analógicos basados en curvas de nivel (Fig. 3). Cuando los MDEs son obtenidos a partir de estéreofotogramas históricos, hay que tener especial cuidado con los errores sistemáticos debidos a la distorsión de las lentes de la cámara, efectos atmosféricos, deformación y deterioro de los fotogramas y de la película, distorsiones en el escaneo, y la falta de precisión y pobre distribución de los puntos de control. El control de la calidad altimétrica del MDE, mediante procedimientos adecuados basados en la obtención de puntos de control de gran precisión<sup>18,19</sup>, permiten estimar el error planimétrico en la delineación de la línea de costa e incorporarlo a modelos espaciales de evolución de la misma.

Centrándonos en nuestra comunidad autónoma, es importante destacar las diferencias existentes entre las marismas del litoral atlántico y las del litoral mediterráneo andaluz. El Estrecho de Gibraltar marca un límite en relación con las mareas: el rango mareal es muy amplio en la costa atlántica andaluza, alcanzando más de 3.5 m. de amplitud máxima (costas mesomareales), mientras que en la costa mediterránea las diferencias máximas entre pleamar y bajamar no suelen superar los 50 cm. (costas micromareales). En las costas micromareales la

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> AGUILAR, F.J., AGÜERA, F., AGUILAR, M.A., 2007, A theoretical approach to modeling the accuracy assessment of digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12), 1367-1380.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> AGUILAR, F.J., AGUILAR, M.A., AGÜERA, F., 2007, Accuracy assessment of digital elevation models using a non-parametric approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(6), 667-686.

componente astronómica no suele superar los 8-10 cm., pero si le añadimos el efecto de la brisa, dicha sobreelevación puede llegar a los 30 cm. en buen tiempo. Durante los temporales y los episodios prolongados de vientos de levante o poniente la sobreelevación meteorológica puede alcanzar 1 m., con un periodo de retorno de 10 años<sup>20</sup>.



Fig. 3. Representación del terreno mediante Modelos Digitales de Elevaciones (MDEs).

#### 4. Teledetección: tratamiento de imágenes digitales.

Las modificaciones antrópicas del terreno natural de la franja litoral conllevan, en la mayoría de las ocasiones, la modificación de las características físico-químicas del mismo. Así, la construcción de edificios, carreteras, pistas deportivas, polígonos industriales, etc., tienen como consecuencia directa un aumento del coeficiente de escorrentía de las aguas de lluvia debido a su prácticamente nula permeabilidad, provocando que casi todo este agua vierta en la red de drenaje. En las zonas donde la transformación de los usos del suelo

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> SÁNCHEZ-ARCILLA, A., JIMÉNEZ, J.A., 1994, Breaching in Wave-Dominated Barrier Split: The Trabucador Bar (Northeastern Spain Coast). *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 483-498.

haya provocado un aumento considerable de las áreas urbanas es imprescindible contar con datos actualizados del porcentaje de superficie impermeable, puesto que este es uno de los inputs de mayor peso en los modelos que estiman la escorrentía total para una determinada área<sup>21</sup>.

La información procedente de sensores remotos tratada con diferentes metodologías ha sido usada para cuantificar de la manera más precisa posible la superficie impermeable, lo que también es útil en otras muchas aplicaciones, como por ejemplo planificación urbana, planificación de redes de comunicación, navegación de vehículos, o incluso en la evaluación de los daños en los edificios tras un terremoto.

Tradicionalmente, la extracción de información espacial de imágenes procedentes de sensores remotos ha sido llevada a cabo de forma manual. Sin embargo, este tipo de tareas son lentas, requieren operadores bien entrenados, y son por consiguiente caras. Además, en zonas con una rápida dinámica en el cambio del uso del suelo, estas técnicas pueden no ser suficientes para tener actualizada la información espacial. Se imponen por tanto técnicas que automaticen lo máximo posible la extracción de la información espacial de imágenes procedentes de sensores remotos. Sin embargo, la mayoría de las disponibles hoy día se encuentran lejos de conseguirlo. Las principales causas que motivan las dificultades en este proceso de automatización están relacionadas por un lado con la variabilidad del tipo de información a extraer, la escala de trabajo, y el nivel de detalle requerido, y por otro lado con la dificultad en la diferenciación de los objetos reconocidos en la imagen.

Los satélites de muy alta resolución (Tabla I) ofrecen la posibilidad de obtener mapas precisos y detallados de los objetos creados por el hombre. Numerosos trabajos de investigación se han enfocado a la extracción de contornos de edificios con el objetivo de la reconstrucción 2D o 3D de los

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> ZUG, M. L., PHAN, D. B., SCRIVENER, O., 1999, Pollution wash-off modelling on impervious surfaces: calibration, validation, transposition, *Water Science and Technology*, 39(2): 17-24.

mismos a partir de imágenes Ikonos<sup>22</sup> o QuickBird<sup>23</sup>, combinando imágenes con resultados de operaciones de clasificación de las mismas<sup>24</sup>.

Las metodologías usadas para llevar a cabo la extracción de información a partir de datos procedentes de sensores remotos son muy diversas, y no se puede afirmar que ninguna de ellas sea la óptima. El trabajo de revisión publicado por Mayer<sup>25</sup> presenta una buena recopilación de técnicas enfocadas a la extracción de edificios basadas en imágenes con diferentes grados de resolución geométrica y espectral, mientras que en el realizado por Lu *et al.*<sup>26</sup> se revisan las técnicas desarrolladas en el campo del procesamiento de las imágenes de sensores remotos cuyo objetivo se centra en el estudio de la evolución del uso del suelo.

La mayoría de las técnicas usadas para la extracción de información son clasificaciones basadas en parámetros estadísticos deducidos de zonas de la imagen estudiada cuya realidad se conoce (signaturas espectrales; ver Fig. 4), y que se pueden aplicar a nivel de píxel o a nivel de objetos homogéneos previamente definidos (segmentación de la imagen).

A partir del trabajo pionero de Ketting y Landgrebe<sup>27</sup>, en el que desarrollaron la técnica que denominaron Extracción y Clasificación de Objetos Homogéneos (ECHO, acrónimo de "Extration and Classification of Homogeneous Objects"), y en el que encontraron que la clasificación de grupos de píxeles con ciertas características comunes fue más robusta, eficiente, y precisa que la clasificación píxel a píxel, han sido numerosos los trabajos que han comparado estas técnicas validando los resultados iniciales, sobre todo

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> KIM, T., LEE, T. Y., AND KIM, K. O., 2006, Semiautomatic building line extraction from Ikonos images through monoscopic line analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 541-549.

<sup>&</sup>lt;sup>549.</sup>
<sup>23</sup> MAYUNGA, S. D., COLEMAN, D. J., and ZANG, Y., 2007, A semi-automated approach for extracting buildings from QuickBird imagery applied to informal settlement mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10), 2343-2357.
<sup>24</sup> LEE, S. D., SHAN, J., AND BETHEL, J., 2003, Class-guided buildings extraction from Ikonos

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> LEE, S. D., SHAN, J., AND BETHEL, J., 2003, Class-guided buildings extraction from Ikonos imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(2), 143-150.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> MAYER, H., 1999, Automatic object extraction from aerial imagery –A survey focusing on buildings. *Computer Vision and Image Understanding*, 74(2), 138-149.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIOS, E., and MORAN, E., 2004, Change detection techniques. International Journal of Remote Sensing, 25: 2365-2407.

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> KETTING, R. L., AND LANDGREBE, D. A., 1976, Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1, 19-26.

cuando se procesan imágenes de alta resolución<sup>28,29</sup>. En relación a los datos ALS, los trabajos que abordan esta tarea suelen utilizar técnicas de filtrado para obtener modelos digitales de elevaciones y de superficies que son empleados como única fuente de información, o bien combinados con otros de diferente naturaleza como imágenes RGB o infrarrojas<sup>30</sup>.



Fig. 4. Procedimiento general para la clasificación de una imagen multiespectral mediante técnicas de clasificación supervisada.

 <sup>&</sup>lt;sup>28</sup> LEE, J. Y., and WARNER, T. A., 2006, Segment based image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 27(16), 3403-3412.
 <sup>29</sup> AGÜERA, F., AGUILAR, F. J., and AGUILAR, M. A., 2008, Using texture analysis to improve per-

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> AGUERA, F., AGUILAR, F. J., and AGUILAR, M. A., 2008, Using texture analysis to improve perpixel classification of very high-resolution images for mapping plastic greenhouses, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(6), 635-646.

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> SOHN, G., DOWMAN, I., 2007, Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 43-63.

Satélite	País	Lanzamiento	Res. PAN (m)	Res. MS (m)	Tamaño (km)
IKONOS-2	US	09/24/99	1.0	4	11
QuickBird-2	US	10/18/01	0.61	2.44	16
EROS B1	Israel	04/25/06	0.7		7
Resurs DK-1	Rusia	06/15/06	1.0	3	28
KOMPSAT-2	Korea	07/28/06	1.0	4	15
IRS Cartosat 2	India	01/10/07	0.8		10
WorldView -1	US	09/18/07	0.5		16
GeoEye-1	US	06/09/08	0.41	1.64	15
WorldView -2	US	2009	0.46	1.84	16
EROS C	Israel	2009	0.7	2.8	11
KOMSAT-3	Korea	2009	0.7	3.2	?
Pleiades-1	Francia	2010	0.7	2.8	20
Pleiades-2	Francia	2011	0.7	2.8	20

Tabla I. Tabla actualizada de satélites comerciales de muy alta resolución geométrica. En rojo aparecen los que en el momento de la redacción de este capítulo todavía no están en órbita. Res. PA: Resolución geométrica de una imagen pancromática. Res. MS: Resolución geométrica de una imagen multiespectral (RGB + infrarrojo cercano).

#### 5. Sensores LiDAR.

Otra fuente de información de alto valor para la extracción de elementos en una determinada zona son los MDEs y Modelos Digitales de Superficies (MDSs) obtenidos a partir de escáneres láser aerotransportados (ALS- LiDAR; acrónimo de "Airborne Laser Scanner - Light Detection and Ranging"). En la Fig. 5 puede observarse la diferencia entre un MDE del terreno (MDT) y un MDS. En este último se tiene en cuenta el denominado microrrelieve (vegetación, edificios, etc.) que se asienta sobre el terreno desnudo, por lo que de la diferencia entre un MDS y el MDE del suelo desnudo podemos obtener lo que se denomina un modelo digital de alturas de objetos.

Un sistema LiDAR es un sensor activo aerotransportado que emite pulsos de luz infrarroja con una frecuencia muy elevada (en algunos modelos más de 150 kHz). Mediante unos relojes de elevadísima precisión se determina el tiempo que tarda cada pulso en volver al emisor y por tanto la distancia al objeto reflector.



Fig. 5. Representación de un Modelo Digital del Terreno y un Modelo Digital de Superficies. La diferencia entre los dos nos permitiría obtener un Modelo Digital de Alturas de objetos.

Los parámetros de orientación externa del sensor en cada momento se obtienen mediante el postproceso de los datos aportados por dos subsistemas complementarios (Fig. 6): 1) GPS diferencial cinemático de precisión en torno a 10 cm., que consta de un GPS montado en el avión y una o varias estaciones de referencia en tierra para transmitir correcciones diferenciales (posición X,Y,Z del sensor respecto al sistema de referencia WGS 84); 2) Sistema IMU ("Inertial Measurement Unit") para la obtención de los ángulos de orientación  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ . La integración de ambos conjuntos de datos, junto con el ángulo de salida y la distancia recorrida por cada pulso láser, permiten reconstruir la línea imaginaria que ha descrito cada rayo en el espacio. De esta forma podemos obtener una nube muy densa de puntos georreferenciados que, dependiendo de la altura de vuelo, la velocidad del avión, el ángulo de escaneo del sensor y la frecuencia de repetición de los pulsos, pueden estar separados por distancias entre 0.25 m. y 2 m. Es decir, se pueden obtener MDEs con una elevadísima resolución espacial (hasta 10 puntos/m<sup>2</sup>) y en un corto periodo de tiempo.

Por otra parte, podemos obtener más de un retorno por cada pulso, lo que suele servir para diferenciar, en primera instancia, el suelo desnudo (último retorno) del microrrelieve (primer retorno).



Fig. 6. Componentes de un sensor LiDAR aerotransportado.

La tecnología ALS tiene como principal ventaja la rapidez y precisión con la que se dispone de los datos altimétricos de la zona escaneada. Existen trabajos recientes que utilizan datos ALS para la extracción de objetos a partir de modelos digitales de alturas o intensidades de retorno<sup>31</sup>, o los combinan con otro tipo de información, como por ejemplo imágenes en color dentro del espectro visible<sup>30</sup>.

### III. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL MONITOREO DE COSTAS. MÉTODOS Y APLICACIONES.

#### 1. Objetivos.

El objetivo fundamental de la propuesta metodológica desarrollada en este trabajo es la integración y análisis exploratorio de datos geoespaciales

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> MILIARESIS, G., and KOKKAS, N., 2007, Segmentation and object-based classification for extraction of the building class from LIDAR DEMs, *Computer and Geoscience*, 33: 1076-1087.

multitemporales/multifuente para el seguimiento y modelado de la evolución y vulnerabilidad de áreas costeras. La aplicación de la metodología desarrollada se está llevando a cabo en la zona piloto que se describe en el siguiente apartado. Dentro de este objetivo genérico se establecen los siguientes objetivos específicos o fases de desarrollo:

- Aplicación, integración y desarrollo de técnicas geomáticas para el estudio de la evolución de la línea de costa y la franja litoral a partir de MDEs y ortoimágenes obtenidos a partir de vuelos fotogramétricos multitemporales y láser escáner aerotransportado.
- 2) Desarrollo y evaluación de técnicas basadas en la integración-fusión de datos georreferenciados, segmentación de objetos y lógica difusa ("Fuzzy Logic") para la detección automática y eficiente de zonas impermeables, edificios e infraestructuras en entornos costeros. Empleo de vuelos fotogramétricos digitales, imágenes de satélite y datos ALS de alta resolución para la inclusión de información multiespectral (RGB + NIr) y morfológica (altura de los objetos).
- 3) Introducción del análisis exploratorio de datos para el modelado de la influencia del crecimiento urbano litoral en los procesos de erosión y/o acreción costera. Aplicación de técnicas geoestadísticas y de regresión y autocorrelación espacial para el modelado de la evolución costera ante diferentes escenarios y evaluación de su coste medioambiental.
- 4) Aplicación de la información recopilada a lo largo de la consecución de los objetivos anteriores en la delineación del área inundada de una zona costera ante diferentes escenarios de riesgo como pueden ser: incremento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático, episodios de fuertes tormentas durante marea alta ("storm surge"), escorrentía y desbordamiento de ramblas y ríos, escorrentía urbana, etc. Estudio de la influencia del sellado superficial, calidad del MDE empleado y la inclusión de Modelos Digitales de Superficie (modelos 3D de ciudades) en la dinámica del flujo y conectividad hidráulica.

#### 2. Zona piloto.

El área de trabajo seleccionada, zona piloto, se sitúa entre las poblaciones de Villaricos y Garrucha, comprendiendo una longitud de unos 11 Km. (Fig. 7). La profundidad de la franja costera explorada será de unos 700 m. La zona incluye la desembocadura de los ríos Almanzora y Antas, junto con urbanizaciones de gran importancia que han experimentado un gran desarrollo durante los últimos años.



Figura 7. Situación de la zona piloto seleccionada. Detalle vectorial sobre la Ortofotografía Digital de Andalucía en color (1998-99) con una resolución geométrica de 1 m.

En un estudio reciente realizado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, la desembocadura del río Antas era catalogada como una zona con riesgo de inundación "muy grave", ocupando una extensión de unas 12.6 has. Estos terrenos inundables mantienen una lámina de agua permanente a lo largo del ciclo anual, aunque su volumen depende de las precipitaciones recogidas en el área. Recientemente se ha propuesto por parte de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía la declaración del Río Antas y sus humedales adyacentes como Lugar de Interés Comunitario.

Por otra parte, la falla Carboneras-Palomares dota a la zona de unas características especiales en cuanto a la posibilidad de actividad sísmica susceptible de provocar tsunamis de naturaleza sismogenética que podrían ser incorporados en el modelo propuesto para el cálculo de riesgo de inundaciones.

Por otra parte, el Informe anual de 2004 de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente, 2005) pone de manifiesto como la zona piloto seleccionada para desarrollar el presente proyecto de investigación se sitúa dentro del área de la costa almeriense con mayor porcentaje de cambios en el uso del suelo (Fig. 8).



Fig. 8. Cambios de uso del suelo en el litoral almeriense (Consejería Medio Ambiente, 2005).

## **3.** Fase I: aplicación, integración y desarrollo de técnicas geomáticas para el estudio de la evolución de la línea de costa y la franja litoral.

#### Inputs necesarios.

Para la consecución de esta primera fase de nuestra propuesta metodológica se necesitan una serie de materiales que desglosamos a continuación:

#### Vuelos fotogramétricos históricos de la zona piloto.

Se trata de cuatro vuelos realizados durante los años 1956, 1977, 1989 y 2000 que son descritos con detalle a continuación:

- A. "Vuelo Americano". Se trata de un vuelo fotogramétrico realizado por el Gobierno de los Estados Unidos en blanco y negro y a escala 1:33000. Se distribuye a través del Servicio Cartográfico del Ejército, generalmente mediante copias de contacto en papel. Por ello se debe digitalizar previamente para permitir su tratamiento con Estaciones Fotogramétricas Digitales, para lo que se suelen emplear escáneres fotogramétricos de alta calidad y con certificado de calibración. La resolución de digitalización se suele situar en unos 21 μm., lo que nos daría un tamaño de píxel en el espacio terreno (GSD: "Ground Sample Distance") de unos 0.70 m. Este vuelo carece de información sobre la calibración de la cámara empleada, aunque la distancia focal nominal viene impresa en los fotogramas.
- B. "Vuelo Interministerial o de Agricultura". Fue realizado en 1977, en blanco y negro y a escala 1:18000. Se distribuye a través del Centro Nacional de Información Geográfica, mediante copias digitalizadas en formato TIFF, con un GSD de 0.38 m. Al igual que en el vuelo anterior, tampoco contamos con el certificado de calibración de la cámara, y sí con la distancia focal impresa en los fotogramas.
- C. Vuelo de 1989. Está constituido por fotografías aéreas del vuelo del litoral de Andalucía en color a escala original de 1:10000, producido para el control urbanístico de la costa de Andalucía. Se distribuye a través del Instituto Cartográfico de Andalucía mediante copias digitalizadas en formato TIFF con un GSD de 0.21 m. También se cuenta con el archivo de calibración de la cámara métrica con la que fue realizado el vuelo.
- D. Vuelo del 2000. Se trata de una actualización del anterior. Lo componen fotografías aéreas del litoral de Andalucía en color a escala original 1:10000 y se distribuye a través del Instituto de Cartografía de Andalucía, teniendo las mismas características que el vuelo anterior.

#### Apoyo de campo y control de calidad.

La obtención de puntos de control para la orientación externa de cada estéreo-par y el de puntos de comprobación independientes para el control de calidad de los MDEs debe abordarse mediante técnicas geomáticas apropiadas. En este caso proponemos el uso de técnicas GPS diferencial en modo RTK (Real Time Kinematic) de alta precisión y el sistema geodésico de referencia ETRS89 (sistema oficial del estado español según recoge el RD 1071/2007) con cotas ortométricas. Dicha técnica de obtención de puntos de control y de comprobación es la recomendada para la orientación de vuelos fotogramétricos con escalas comprendidas entre 1:4000 y 1:50000<sup>32</sup>. Los elementos y técnicas empleadas para la configuración de la red de puntos terreno pueden encontrarse en el trabajo publicado por Aguilar et al.<sup>33</sup>. El control de calidad de los productos cartográficos elaborador debe basarse en técnicas de validación verdadera mediante el cálculo de errores en una serie de puntos de comprobación ("check points") distribuidos uniformemente sobre el área de trabajo (Fig. 9).

#### Vuelos con cámara digital y sensor LiDAR incorporado.

Estos vuelos, tecnológicamente muy avanzados, consisten en la obtención de fotogramas digitales de muy alta resolución RGB+NIr (12 bits por canal) con cámaras específicas (*e.g.* cámara DMC de Intergraph o ADS40 de Leica), con un GSD entre 0.10 y 0.20 m. Al mismo tiempo que se obtienen las imágenes de alta resolución, se puede adquirir una nube de puntos de alta precisión mediante un sistema ALS (*e.g.* LiDAR ALS50-II de Leica) dotado con sistemas INS-GPS para la adquisición directa de las coordenadas UTM ETRS89 y las alturas elipsoídicas y ortométricas de cada punto. La densidad de puntos obtenida debe ser

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> CHANDLER, J. H., 1999, Effective Application of Automated Digital Photogrammetry for Geomorphological Research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1), 51-63.

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> AGUILAR, F.J., CARVAJAL, F., AGUILAR, M.A., AGÜERA, F., 2007d, Developing digital cartography in rural planning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55(2), 89-106.

superior a 1 punto/m<sup>2</sup> con una precisión planimétrica de 0.5 m. y altimétrica de 0.15 m., permitiendo la generación de MDEs y MDSs de muy alta resolución. Dependiendo de los modelos de sensor LiDAR, pueden obtenerse incluso más de 4 retornos del mismo pulso láser para la clasificación y modelado de zonas de vegetación.



Fig. 9. Esquema básico para la ejecución del control de calidad de un MDE.

#### Cartografía complementaria que puede emplearse en el ámbito andaluz.

Consiste en cartografía analógica y digital complementaria, disponible para el litoral andaluz, procedente de diversas fuentes para el seguimiento de la evolución 2D de la línea de costa como apoyo a los MDEs 3D generados según nuestra propuesta metodológica. Su objeto es servir como ayuda al reconocimiento y digitalización de elementos antrópicos construidos en la franja litoral de la zona piloto. Entre estos productos podemos destacar:

- A. Ortoimagen Digital de Andalucía, año 2001-2002. Imágenes pancromáticas con un GSD de 0.5 m. (Junta de Andalucía, 2004). Este producto presenta, en un mosaico continuo, el conjunto de las imágenes georreferenciadas de la provincia, con ámbito y numeración similar al Mapa Topográfico Andaluz 1:10.000. Se acompaña de las siguientes capas de información vectorial: límites municipales, núcleos de población, red de carreteras, red hidrográfica y toponimia.
- B. Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Extraído a partir de un vuelo a escala 1:20000 (Junta de Andalucía, 2005), en formato malla, con una resolución de 10 m. y precisión altimétrica de unos 1.70 m.
- **C. Mapa Topográfico del Litoral y Aglomeraciones Urbanas.** Producto ráster a escala 1:5000, elaborado a partir de fotogramas 1:18000 y 1:15000 durante 1990.
- D. Visor tridimensional interactivo para la gestión del litoral andaluz (SIGLA: Sistema de Información Geográfica del Litoral de Andalucía). Mantenido por la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía mediante el vuelo interactivo del litoral andaluz<sup>34</sup>.
- E. Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1:10000. Generado por el Instituto de Cartografía de Andalucía.
- F. Planos del Plan General de Urbanismo de la Provincia de Almería. Obtenidos a partir de un vuelo a escala 1:25000 realizado en 1990.

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> OJEDA, J., CABRERA, A., 2006, Utilidades y funcionalidades de un visor tridimensional interactivo en la gestión del litoral (SIGLA: Sistema de Información Geográfica del Litoral de Andalucía). *Cuadernos Geográficos*, 39(2006-2), 41-52.

#### Procedimientos específicos para el desarrollo de la fase I.

Dada la dificultad de la obtención de puntos de control bien distribuidos y en número suficiente para la orientación externa de fotogramas históricos, nuestro grupo de investigación está desarrollando y validando nuevas técnicas de extracción de puntos de control a partir de DEMs o superficies topográficas digitales generadas mediante tecnología ALS. Estas técnicas emergentes han sido objeto de especial atención en los últimos años y resultan de gran interés en casos estudios de detección de cambios en el terreno a partir de fotografías históricas o en zonas inaccesibles<sup>35</sup>. La metodología propuesta se basa en la generación y comparación de modelos sombreados a partir de MDEs obtenidos mediante tecnología ALS (MDE de nueva obtención) V estereofotogrametría (MDE histórico). En este caso se simulan por ordenador las condiciones de iluminación solar que se produjeron en el momento de la toma de fotogramas del vuelo fotogramétrico que se pretende orientar. La aplicación de algoritmos de "Image Matching" entre los modelos sombreados 2D pertenecientes a fotogramas multitemporales y la detección automática de puntos homólogos permite la obtención de puntos de control basados en formas geomorfológicas y relieve más que en detalles directamente georreferenciables (Fig. 10).

También se están explorando y desarrollando técnicas de correlación o correspondencia automática (*"surface matching"*) de DEMs multitemporales generados a partir de datos multifuente como pueden ser estereofotogrametría digital, ALS y GPS<sup>36,37</sup>. El objetivo no es otro que la orientación automática de MDEs mediante ajuste por mínimos cuadrados a un modelo de referencia de gran fiabilidad (*i.e.* los MDEs de

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> JAMES, T.D., MURRAY, T, BARRAND, N.E., BARR, S.L., 2006, Extracting photogrammetric ground control from lidar DEMs for change detection. The Photogrammetric Record, 21(116), 312-328.

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> MILLS, J.P., BUCKEY, S.J., MITCHELL, H.L., 2003, Synergistic fusion of GPS and photogrammetrically generated elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(4), 341-349.

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> MILLER, P., MILLS, J.P., EDWARDS, S., BRYAN, P., MARSH, S., HOBBS, P., MITCHELL, H.L., 2007, A robust surface matching technique for integrated monitoring of coastal geohazards. *Marine Geodesy*, 30, 109-123.

alta precisión obtenidos mediante tecnología ALS). Este procedimiento permite pasar de una orientación relativa del MDE obtenido fotogramétricamente a una orientación absoluta mediante una transformación Helmert 3D y la reducción de errores sistemáticos en los DEMs obtenidos, además de observar e identificar zonas con deformación, bien por acreción o erosión de material. El algoritmo propuesto puede observarse en la Fig. 11.



Fig. 10. Matching entre DEMs sombreados y fotogramas históricos sin el apoyo de puntos terreno.

Por otra parte, y dado que los parámetros internos de la cámara utilizada en vuelos históricos suelen ser desconocidos, se están explorando y comparando procedimientos para la incorporación de estos parámetros en el ajuste por mínimos cuadrados del bloque fotogramétrico. Este proceso es conocido como autocalibración ("*self-calibration*<sup>38</sup>"). La autocalibración es un método muy utilizado en fotogrametría de objeto cercano donde las cámaras utilizadas suelen ser

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> CHANDLER, J. H., COOPER, M. A. R., 1989, The Extraction of Positional Data from Historical Photographs and Their Application to Geomorphology. *The Photogrammetric Record*, 13(73), 69-78.

no métricas, aunque para la obtención de la solución matemática óptima en este caso necesitaremos un mayor número de puntos de control<sup>39</sup>.



Fig. 11. Matching automático de DEMs multitemporales sin el apoyo de puntos terreno para el estudio de la evolución de la franja litoral. X,Y, Z son las coordenadas terreno del modelo de referencia, mientras que x,y,z son sus homónimas en el modelo a orientar.

Los parámetros de orientación interna de la cámara pueden ser estimados utilizando metodologías de autocalibración mediante modelos matemáticos típicos de la fotogrametría de objeto cercano, aunque algunas Estaciones Fotogramétricas Digitales incluyen en sus módulos de aerotriangulación los llamados "parámetros adicionales" basados en ajustes polinómicos (modelos de Ebner, Jacobsen, Brown, Bauer...). Este es el caso del paquete fotogramétrico Leica ORIMA-LPS (Leica Geosystems, 2003), que está siendo utilizado con éxito para la

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> AGUILAR, M.A., AGUILAR, F.J., AGÜERA, F., CARVAJAL, F., 2005a, The Evaluation of Closerange Photogrammetry for the Modelling of Mouldboard Plough Surfaces. *Biosystems Engineering*, 90 (4), 397–407.

orientación de estéreo-pares de fotogramas históricos por parte de nuestro grupo de investigación.

En cualquier caso, y una vez orientados los distintos vuelos históricos, se deber proceder a la obtención y edición del MDE de la franja litoral correspondiente a la zona piloto para, a continuación, computar las ortoimágenes correspondientes a cada vuelo. Para ello se suelen emplear potentes Estaciones Fotogramétricas Digitales como Z/I Imaging de Intergraph o SOCCET SET de BAE Systems.

El control de calidad de los DEMs obtenidos, crucial para obtener la incertidumbre de los resultados finales, se llevará a cabo tanto por medios estereofotogramétricos como a partir de datos ALS filtrados (eliminación del microrrelieve para la obtención del suelo desnudo; ver Fig. 12) con herramientas como Terrascan© (Terrasolid Ltd., Finlandia). En este caso aconsejamos el uso de modelos de estimación de la precisión altimétrica no paramétricos como los desarrollados por los autores de este capítulo<sup>18,19,40</sup>.

Por último, a partir de los MDEs obtenidos y de su calidad estimada puede delinearse la línea de costa (curva de nivel de cota nula) para cada uno de los años de estudio y asignársele a cada punto la incertidumbre correspondiente en función de la pendiente local y del error atribuible al propio DEM. Igualmente se puede estudiar la evolución 3D de la franja costera piloto a partir de la detección de cambios (erosión y deposición de materiales) obtenida a partir de la comparación de MDEs multitemporales.

#### Outputs obtenidos a partir de la consecución de la primera fase.

- i. Evolución 2D de la línea de costa de la zona piloto desde 1957.
- ii. Detección de zonas de acreción y regresión costera.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> AGUILAR, F.J., MILLS, J.P., 2008, Accuracy assessment of lidar-derived digital elevation models. *The Photogrammetric Record*, 23(122), 148-169.

- iii. Determinación de la incertidumbre en la ubicación de dicha línea de costa basándonos en la teoría de propagación de errores y la pendiente local.
- iv. Evolución 3D de la franja costera estudiada mediante comparación de MDEs multitemporales (detección de cambios).
- v. Identificación de zonas sensibles y desaparición de arenales.



Fig. 12. Filtrado automático del último pulso de datos LiDAR (arriba) para la obtención del modelo digital del terreno desnudo (abajo). Operación realizada con el software Terrascan©.

4. Fase II: detección automática y eficiente de zonas impermeables, edificios e infraestructuras en entornos costeros a partir de datos georreferenciados multitemporales y multifuente.

Inputs necesarios.

**A. Ortoimágenes**. Obtenidas a partir de los vuelos fotogramétricos históricos de la zona piloto comentados y descritos anteriormente (años 1956, 1977, 1989 y 2000).

**B. Ortoimágenes de la Junta de Andalucía.** Ortofotografía digital de Andalucía (color, bandas RGB) del año 1998 con un GSD de 1 m. También se puede disponer de la ortofotografía digital de Andalucía (blanco y negro) del año 2001 con un GSD de 0.5 m.

**C. Ortoimágenes de muy alta resolución actuales.** Obtenidas a partir de campañas de nueva ejecución realizadas con cámara digital (RGB + NIr) con un GSD de 0.2 m.

**D. Datos ALS brutos en formato LAS**. Nube de puntos LiDAR agrupados por retornos e imagen de intensidades obtenidos a partir de campañas de nueva ejecución con sensor LiDAR.

**E. Imagen de satélite de muy alta resolución QuickBird.** Se trata de una imagen básica comprendiendo la zona piloto y las escenas de la banda pancromática (GSD = 0.6 m.) y multiespectral (RGB + NIr con GSD = 2.5 m.), producto conocido como "Bundle Product".

#### Procedimientos específicos para el desarrollo de la fase II.

Dentro del desarrollo y validación de técnicas de clasificación automática de imágenes, que supone el núcleo de este apartado metodológico, el primer paso debe consistir en la definición de las clases objetivo que, en general, podrían ser zonas con vegetación densa, vegetación dispersa, suelo desnudo sin sellar, agua, edificios, carreteras y pistas deportivas.

Cuando tratamos de clasificar imágenes digitales (color o pancromáticas) de forma supervisada (Fig. 13), en primer lugar debemos definir tanto las zonas de entrenamiento para llevar a cabo la clasificación (distintas signaturas obtenidas a partir del vector de características para cada clase), como aquellas usadas para estudiar la precisión de la misma (control de calidad del método evaluado). Se recomienda extraer dichas zonas homogéneas mediante la fotointerpretación asistida y la visita a campo cuando haya alguna duda.

En este sentido, las fotografías de muy alta resolución tomadas con cámara digital deben ser acompañadas de una campaña de campo consistente en identificar en la imagen zonas del terreno con diferentes usos. Estas zonas deben estar bien distribuidas por toda el área de estudio, geo-referenciando su perímetro mediante técnicas GPS RTK.

Una vez realizada la obtención de las zonas de entrenamiento, nuestra propuesta metodológica aborda cuatro estrategias básicas y complementarias para la clasificación avanzada de imágenes digitales de muy alta resolución:

i. Integración de la textura e información espacial (vecindad) para la mejora de la clasificación por píxeles.

ii. Segmentación y clasificación de objetos, más que de píxeles ("region merging techniques") donde se determina un valor de heterogeneidad que es función lineal del color y de la forma (compacidad, ortogonalidad, etc.).

iii. Fusión de datos integrando información morfológica 3D (datos LiDAR) con datos espectrales.

 iv. Aplicación de clasificadores no paramétricos basados en
 "Machine Learning" (reglas de decisión generadas automáticamente a partir de áreas de entrenamiento mediante métodos inductivos)

El empleo de técnicas de clasificación de imágenes orientadas a objetos más que a píxeles suele ser preferible cuando trabajamos con imágenes de alta resolución en entornos urbanos, disminuyendo el coste computacional de posteriores clasificaciones supervisadas basadas en, por ejemplo, reglas de decisión o lógica difusa. Bajo esta hipótesis se imponen el uso de la segmentación de objetos mediante técnicas estadísticas para la agrupación de píxeles con similar respuesta espectral en las bandas RGB + NIr. Un buen candidato como software de referencia para realizar este tipo de segmentación avanzada puede ser eCognition© (Definiens Imaging GmbH, Manchen, Alemania<sup>41</sup>). La elección de los parámetros óptimos que definen la segmentación puede abordarse siguiendo la metodología propuesta por Wang *et al.*<sup>42</sup>, que consiste en tomar las zonas de entrenamiento definidas y llevar a cabo la segmentación con diferentes grupos de valores de los parámetros. El grupo de valores que dé como resultado la mayor separación entre los objetos homogéneos resultantes será seleccionado como óptimo. El parámetro propuesto para medir la distancia entre objetos puede ser el de Bhattacharya o el de Jeffries-Matusuta<sup>43</sup>.

Dentro de los algoritmos de clasificación y exploración de datos conocidos como "Machine Learning", el software See5© (Data Mining Tools de RuleQuest<sup>44</sup>), diseñado en principio para procesos cognitivos relacionados con la inteligencia artificial, puede resultar un potente clasificador no paramétrico y ser usado en procesos de clasificación supervisada de los segmentos previamente definidos con eCognition©. La hipótesis de partida es que muchas de las clases que se pretende segmentar y clasificar presentan distribuciones espectrales sesgadas y por tanto no son ideales para la aplicación de técnicas de clasificación tradicionales basadas en métodos paramétricos como el método de máxima verosimilitud.

Este tipo de algoritmos construyen reglas de decisión lógicas, con inclusión de incertidumbre, del tipo "if-then" (Fig. 14) basándose en la información recopilada sobre cada objeto o datos de entrenamiento; en nuestro caso reflectancia media en las bandas R,G,B NIr, parámetros de textura e información morfológica (forma del objeto o altura del mismo).

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> BAATZ, M., BENZ, U., GEHGHANI, S., NEYNEN, M., HOLTJE, A., HOFMANN, P., LINGENFELDER, I., MIMLER, M., SOHLBACH, M., WEBER, M., WILLHAUCK, G., 2001, *eCognition object oriented image analysis, user guide*, Definiens Imaging, Munich, Alemania. <sup>42</sup> WANG, L., SOUSA, W., GONG, P., BIGING, G. S., 2004, Comparison of Ikonos and QuickBird

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> WANG, L., SOUSA, W., GONG, P., BIGING, G. S., 2004, Comparison of Ikonos and QuickBird images for mapping mangrove species on the caribean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, 91, 432-440.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> RICHARDS, J.A., 1986, Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction. Springer-Verlag, Berlin.

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> TULLIS, J. A., JENSEN, J. R., 2003, Expert system house detection in high spatial resolution imagery using size, shape, and context. *Geocarto International*, 18(1): 5-15.



Fig. 13. Selección de zonas de entrenamiento para la determinación de las signaturas o firmas correspondientes a cada clase en el caso de la clasificación supervisada.

En este sentido proponemos la inclusión de la información morfológica de los objetos (árboles, edificios, etc.) a partir de los datos ALS filtrados previamente. En efecto, a partir de los datos ALS se pueden obtener MDEs y MDSs (envolvente de la vegetación y edificios, ver Fig. 5). A partir de estos dos modelos de elevaciones se obtendrá el modelo de elevaciones del microrrelieve (modelo de alturas de ciudad y de vegetación) por simple sustracción al MDS del MDE. La hipótesis es que esta información podría mejorar los resultados de la clasificación debido a la información complementaria que aporta, añadiendo nuevas bandas al proceso de clasificación tales como pendiente y altura media de cada objeto, lo que permite establecer nuevas reglas lógicas de decisión.

Todas las técnicas aplicadas para imágenes aéreas deben ser, en principio, apropiadas para su aplicación a la clasificación de imágenes de

satélite de alta resolución (QuickBird, GeoEye, WorldView, etc.). El uso de este tipo de imágenes de satélite aporta una característica muy importante en la gestión integrada de áreas costeras, como es su flexibilidad para seleccionar el tiempo y la frecuencia de adquisición, prácticamente "a la carta". Por otra parte, la posibilidad de emplear el canal pancromático, de mayor resolución, como base geométrica para la fusión de la información ofrecida por los canales espectrales (pansharpening), de menor resolución, permite obtener imágenes de una calidad radiométrica y geométrica realmente excepcionales para una posterior clasificación manual o automática (Fig. 15).



Fig. 14. Reglas de decisión para la clasificación de usos del suelo obtenidos a partir de software basado en métodos "Machine Learning". Nótese como todas las reglas tienen un cierto nivel de confianza asociado.

#### Outputs obtenidos a partir de la consecución de la segunda fase.

Los resultados esperados tras la consecución del Objetivo 2 serían los siguientes:

- Evolución del sellado del terreno y urbanizaciones desde el año 1957 en la zona piloto.
- ii. Georreferenciación de las áreas impermeables para su posterior utilización en la fase cuarta de esta propuesta metodológica.
- Evaluación de la precisión y eficiencia en la clasificación automática de imágenes digitales de alta resolución en zonas urbanas costeras.
- iv. Obtención de Modelos Digitales de Superficie (MDS), incluyendo edificios e infraestructuras (modelos de ciudad 3D), además de MDEs donde se ha filtrado el microrrelieve, para su posterior utilización en la fase cuarta de esta propuesta metodológica.
- v. Propuesta metodológica para sistematizar el flujo de trabajo conducente a la obtención de la evolución futura del grado de impermeabilidad de una zona a partir de imágenes de satélite de muy alta resolución (*e.g.* QuickBird o GeoEye).
- vi.



Fig. 15. Imagen del satélite QuickBird multiespectral con resolución de 2.5 m. (izquierda). Imagen del satélite QuickBird pancromática fusionada con multiespectral con resolución de 0.6 m (derecha).

# 5. Fase III: Introducción del análisis exploratorio de datos para el modelado de la influencia del crecimiento urbano litoral en los procesos de erosión y/o acreción costera.

Durante los últimos años se detecta una creciente demanda de técnicas que hagan algo más que obtener, clasificar y organizar los datos georreferenciados<sup>45</sup>. La estadística espacial ha emergido como una herramienta fundamental para explorar e identificar lo que ha veces se denominan "datos ocultos" o patrones espaciales o espacio-temporales entre valores de una determinada variable no evidentes de una forma explícita<sup>46</sup>.

Dado que el aspecto espacial de la Ley de Tobler o "primera Ley de la Geografía" suele ser la regla, más que la excepción, en los procesos desarrollados en la Naturaleza, la asunción clásica de la independencia espaciotemporal de los datos debe ser revisada mediante nuevas técnicas estadísticas que aporten medidas de la autocorrelación espacio-temporal de las medidas y su relación con fenómenos correlacionados (covariables) como puede ser la presencia de urbanizaciones costeras (Regresión espacial).

Autores como Anselin<sup>46</sup> o Longley<sup>47</sup> ponen de manifiesto la carencia de herramientas especializadas en técnicas para el análisis espacial de la información georreferenciada y, en particular, modelos de estadística espacio-temporal que aúnen las dimensiones de tiempo y espacio en el análisis de series temporales (modelos autorregresivos y modelos autorregresivos condicionales) de variables georreferenciadas, como podría ser el retraimiento o acreción anual de la línea de costa. Por otra parte, la evidente autocorrelación espacial y temporal entre datos obtenidos en la vecindad de un mismo emplazamiento, hacen necesario el empleo de técnicas geoestadísticas para filtrar datos "solapados" que no aportan información adicional y disminuyen, a veces significativamente, la variabilidad real de la variable observada<sup>48,49</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> WALTER, N., 2001. *Spatial interpolation*. University of Calgary, Canada.

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> ANSELIN, L., 1998. Exploratory Spatial Data Analysis in Geocomputational Environment. John Wiley & Sons.

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> LONGLEY, P., 2001. Foundations in Geocomputation. John Wiley & Sons.

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> DOLAN, R., FENSTER, M.S., HOLME, S.J., 1991a, Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723-744.

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> DOLAN, R., FENSTER, M.S., HOLME, S.J., 1991b, Spatial analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 8(2), 263-285.

Muchos modelos de evolución de la línea de costa establecen una simple proyección lineal de la tasa de regresión o acreción medida a lo largo de años anteriores mediante series históricas de datos. Sin embargo, dichos modelos de tipo determinístico, al contrario de los modelos estocásticos, no incorporan la necesaria incertidumbre de las predicciones, además de ser, en muchos casos, demasiado simples y dependientes de que se garanticen las condiciones locales en las que se determinó la tasa de regresión-acreción costera. En general, estos modelos lineales y determinísticos son insuficientes por varias razones, entre las que podemos destacar<sup>50</sup>:

- i) Los datos históricos sobre evolución de la línea de costa son escasos y, a veces, carecen de una incertidumbre asociada.
- ii) Múltiples variables que intervienen en la acreción-regresión de la línea de costa son evidentemente de naturaleza estocástica (tormentas, régimen de vientos, etc.) por lo que sólo podrían incluirse en términos estadísticos.
- iii) Las condiciones de contorno de la zona de aplicación pueden variar a micro o macroescala en el futuro.
- iv) La dinámica de la línea de costa es extremadamente compleja.

De esta forma, los modelos probabilísticos para la predicción de la evolución de la línea de costa deben imponerse a los meramente determinísticos, porque además dicha tendencia es consistente con los métodos probabilísticos establecidos para el cálculo del riesgo y el diseño de defensas contra inundaciones en ingeniería civil o los modelos de erosión de playas. En esta línea de pensamiento encontramos a las técnicas geoestadísticas de interpolación no lineales, donde se pretende estimar la esperanza condicional del valor de una variable a partir de datos colindantes y de ciertas covariables que ayuden a reducir, aunque sea indirectamente, la incertidumbre de la medida interpolada. Más que la predicción exacta y puntual de una medida de regresión-acreción de la línea de costa, cuyo valor práctico sería bastante discutible, se requieren

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> HALL, J.W., MEADOWCROFT, I.C., LEE, E.M., VAN GELDER, P.H., 2002. Stochastic simulation of episodic soft coastal cliff recession. *Coastal Engineering*, 46, 159-174.

modelos probabilísticos de "comportamiento de la costa" que nos permitan construir escenarios futuros de evolución de la misma ante condiciones de contorno cambiantes, como puede ser el incremento del nivel del mar debido al cambio climático, o el incremento de la escorrentía superficial debido al sellado del terreno urbanizado y su influencia en la delineación de los mapas de inundaciones.

Actualmente nos encontramos desarrollando un software, junto con la Universidad Nova de Lisboa, denominado MyGeoffice® (Fig. 16) que será el marco de referencia para la implementación y evaluación de técnicas de análisis espacial especialmente adaptadas al tratamiento de datos relacionados con la evolución de la línea de costa y su correlación espacio-temporal con procesos de sellado antrópico de áreas costeras (edificaciones, vías de comunicación, etc., como outputs de la fase anterior). En este sentido, la implementación de técnicas geoestadísticas avanzadas, como la aproximación morfológica del profesor Soares<sup>51</sup>, junto con modelos de regresión espacial no necesariamente lineales, pretenden obtener escenarios de vulnerabilidad a los efectos antrópicos en función de variables relacionadas con la geomorfología de la línea de costa (2D y 3D).

Igualmente, la introducción y el manejo de la incertidumbre, típica de modelos probabilísticos, será abordada mediante procedimientos de simulación estadística.

Por otra parte, los fenómenos de autocorrelación espacial entre variables georreferenciadas (evolución temporal de la línea de costa para cada tiempo t) introducen una disminución de la variabilidad de la variable observada (por ejemplo acreción o regresión costera), circunstancia que hay que cuantificar y corregir para evitar su propagación en el análisis de regresión. Índices como el I de Moran y su correlograma pueden ayudar a la inclusión en la generación del semivariograma de los patrones de autocorrelación espacial detectados. También debemos explorar otros índices alternativos de autocorrelación espacial como Geary C y LISA<sup>46</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> SOARES, A., 2000, Geoestatistica para as Ciencias da Terra e do Ambiente. IST Press



Fig. 16. Correlograma de autocorrelación espacial (I de Moran a la izquierda) y semivariograma para una variable espacialmente geo-referenciada (MyGeoffice®).

A partir de los resultados obtenidos en el análisis previo se propone el desarrollo, calibración y evaluación de un modelo de simulación estocástica secuencial basada en el esquema de Monte Carlo que permita predecir el efecto que el incremento del sellado del suelo y la presencia de núcleos de población puede tener en la aportación de sedimentos al mar y, por tanto, en el incremento de los procesos de regresión costera.

# 6. Fase IV: Modelado y obtención de mapas de riesgo de inundación en una zona costera ante diferentes escenarios o condiciones de contorno.

#### 6.1. Introducción.

La simulación de inundaciones en zonas costeras debidas a diferentes factores, a veces concurrentes, como son el incremento del nivel del mar ante el proceso de cambio climático, la manifestación de fuertes tormentas con la generación de bajas presiones y oleaje, las lluvias torrenciales y el desbordamiento de ríos y ramblas, conducen a situaciones críticas donde interesa delinear las zonas de alto riesgo para vidas humanas.

Por otra parte, los núcleos urbanos, y el sellado artificial del terreno que suponen, modifican en cierto modo las condiciones en las que se produce la escorrentía superficial, incrementando la misma y aportando su granito de arena en el empeoramiento de los efectos producidos por estas catástrofes naturales. En este sentido conviene disponer de modelos numéricos basados en ecuaciones físicas, como la conservación de masa y momento o la conectividad hidráulica, que nos permitan simular con una cierta aproximación el flujo de agua en la zona inundada aunando modelos hidrológicos e hidráulicos que hacen innecesaria la separación de los procesos de escorrentía superficial y el flujo hidráulico en canales.

La delineación de zonas costeras potencialmente inundables y el riesgo para la población que esto supone necesita ser evaluado dentro de las condiciones de contorno actuales. Pero los modelos de cálculo deben ser lo suficientemente flexibles como para ser aplicables en el caso probable de cambios de escenario. En este sentido se ha avanzado mucho durante los últimos años, desarrollándose metodologías para el cálculo probabilístico del riesgo de inundaciones y para la gestión de costas basada en dichas estimaciones<sup>52,53</sup>.

En el corazón de todos los métodos para calcular el riesgo de inundaciones en zonas costeras se sitúa el requerimiento de predecir el nivel del agua y la delineación de la extensión de la zona inundable que tendrá lugar para una determinada combinación de variables, como son las condiciones meteorológicas, nivel de la marea, sistemas de defensa y probabilidad asociada de fallo, desbordamientos de ríos y ramblas, etc.

Modelos recientes basados en el mallado y discretización de la progresión del flujo como el LISFLOOD- $FP^{54}$  o Flo- $2D^{\odot}$  (FLO-2D Software, Inc., 2004) representan una herramienta imprescindible para la planificación de las defensas costeras ante las eventuales catástrofes naturales (Fig. 17).

Estos modelos se han usado en diversos trabajos para simular los efectos producidos por inundaciones en valles aluviales causadas por desbordamiento

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> REEV, D.E., 1998, Coastal flood risk assessment. *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(5), 219-228.

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> HALL, J.W., DAWSON, R.J., SAYERS, P.B., ROSU, C., CHATTERTON, J.B., DEAKIN, R., 2003. A methodology for national-scale flood risk assessment. Water and Maritime Engineering, 156(3), 235-247.

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> BATES, P.D., DE ROO, A.P.J., 2000. A simple raster-based model for foodplain inundation. *Journal of Hydrology*, 236, 54-77.

de ríos<sup>55</sup> y por desbordamiento del mar en zonas costeras debido al fuerte oleaje causado por tormentas o por la acción de tsunamis<sup>56</sup>.



Fig. 17. Mapa de inundación expresada como altura de agua sobre el terreno original (Flo 2D<sup>©</sup>).

La inclusión de MDSs referentes a edificios (modelos de ciudad 3D obtenidos a partir de tecnología ALS como el presentado en la Fig. 18) pueden incrementar ostensiblemente el realismo de la simulación al incrementar la rugosidad del contorno donde se produce el flujo y tener en cuenta la pérdida de energía producida por este motivo.

Algunos trabajos previos<sup>57</sup> han analizado la influencia de la resolución espacial de los MDEs sobre los resultados de la simulación de la inundación y han llegado a la conclusión de que dicha resolución puede llegar a afectar significativamente a los resultados finales, por lo que nuestra propuesta metodológica incluye el empleo de modelos de ciudades 3D lo más precisos posible para delimitar la zona inundable.

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> O'BRIEN, J.S., ZHAO, B., 2004. Real Time Rainfall-Runoff Modeling on Alluvial Fans, Floodplains and Watersheds. *ASCE World Water & Environmental Resources Congress - Arid Lands Symposium*, Salt Lake City, Utah.

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> O'BRIEN, J. S. 2005. Modeling Tsunami Waves and Ocean Storm Surges with FLO-2D®. American Water Resources Association, 2005 Summer Specialty Conference, Institutions for Sustainable Watershed Management, Honolulu, Hawaii.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> HORRIT, M.S., BATES, P.D., 2001. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, 253, 239-249.



Fig. 17. Modelo 3D de ciudad obtenido a partir del MDS capturado mediante tecnología LiDAR.

#### 6.2. Construcción del modelo de simulación.

La primera componente del modelo de simulación estará constituida por el subsistema hidrológico de la zona de estudio, es decir, la desembocadura del río Antas. Dicho río puede considerarse un modelo representativo de rambla mediterránea, que además desemboca en una zona endorreica con riesgo de taponamiento por formación de berma en la playa. Por otra parte, y a diferencia del río Almanzora, se trata de una cuenca no regulada.

Para la construcción del modelo se deben emplear como base los modelos digitales obtenidos en los objetivos previos y que tienen diferente grado de resolución y precisión. También se debe elaborar la cartografía de las variables hidrológicas necesarias, las características del suelo y de la cubierta vegetal (infiltración, rugosidad superficial, etc.). Para la obtención de esta cartografía se propone el uso de métodos basados en la explotación de las imágenes de satélite y fotografía aéreas obtenidas a partir de los vuelos fotogramétricos (clasificaciones multiespectrales, elaboración de índices de vegetación, etc.). En aquellos casos en los que la información obtenida no sea totalmente satisfactoria, se deberían realizar ensayos de campo para la caracterización de la zona.

También se deben introducir en el modelo los datos climáticos necesarios para las simulaciones de los eventos históricos de inundación con objeto de calibrar el modelo desarrollado y para la generación de escenarios de riesgo de inundaciones.

La calibración y ajuste del modelo implica recopilar la información disponible sobre pasados eventos de inundación. Se dispone de datos de inundaciones ocurridas en los años 1973 y 1989, fundamentalmente material fotográfico en el que se observa el nivel alcanzado por el agua en dichas inundaciones. Obviamente, también se deben introducir los datos de precipitación y otras variables climáticas que originaron dichas inundaciones históricas. Con estos datos se realizará una ejecución del modelo de simulación para conocer su grado de ajuste a los datos experimentales. Se emplearán métodos de optimización heurísticos para la calibración de los parámetros más significativos del modelo de forma que se optimice el ajuste de los resultados<sup>58</sup>. En esta fase se analizará el efecto de la resolución espacial de los distintos modelos digitales de elevaciones en los resultados obtenidos en las simulaciones de inundación y se analizará su grado de precisión.

Una vez desarrollado y calibrado el modelo de simulación para la zona de estudio, se procede a realizar simulaciones para los escenarios de riesgo previsibles. Para ello se propone una caracterización estocástica de las variables climáticas determinantes (precipitación, viento, etc.) para conocer su probabilidad de ocurrencia. Además se deben tener en cuenta otros factores de riesgo como el posible incremento de zonas selladas por efecto de nuevas urbanizaciones. En este sentido el modelo debe permitir estudiar el riesgo de inundaciones producidas por el efecto combinado de la concurrencia simultánea de varios factores; por ejemplo, una gran precipitación más fuerte oleaje. Además pueden simularse no solamente los

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrological models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrology Engineering ASCE*, 4(2): 135–143.

escenarios previsibles a corto plazo, sino que además pueden preverse los efectos del cambio climático tanto sobre el incremento del nivel del mar como en la posible modificación de precipitaciones.

# 6.3. Outputs obtenidos a partir de la consecución de la cuarta y última fase de la propuesta metodológica descrita.

- i. Recomendaciones sobre la resolución adecuada para los modelos digitales del terreno que se elaboren para este tipo de estudios de modo que se obtenga la mejor relación coste-beneficio.
- ii. Delimitación de las zonas de riesgo y zonas potencialmente urbanizables para la zona en estudio y recomendaciones aplicables a zonas similares.
- iii. Riesgos asociados a una posible mala gestión urbanística: análisis del efecto producido por el incremento de la superficie sellada, por la creación de barreras urbanísticas y reducción de las redes naturales de drenaje.
- iv. Valoración de los riesgos asociados a los efectos previsibles del cambio climático sobre las zonas costeras.

#### **IV. CONCLUSIONES.**

La consecución de las fases descritas en esta propuesta metodológica debe permitir obtener información relevante y desarrollar herramientas útiles para la toma de decisiones en relación a la gestión de nuestras costas. A lo largo de la exposición desarrollada en este capítulo se ha puesto de relieve la preocupante situación medioambiental que amenaza el futuro de nuestro litoral, agravada, si cabe, por el incipiente proceso de cambio climático al que nos vemos abocados. Aunque es responsabilidad de las instituciones públicas competentes el tomar decisiones y medidas de prevención al respecto, no es menos cierto que los científicos debemos proveer los modelos y herramientas de simulación apropiadas para garantizar, conociendo y aportando la incertidumbre de los datos que manejamos, que esas decisiones sean lo más acertadas posibles.

En este sentido parece obvia la necesidad de desarrollar sistemas eficaces de seguimiento ("monitoring") de la evolución de nuestro litoral. Los resultados obtenidos

con la consecución de las fases 1 y 2 pretenden dar respuesta a esta necesidad, integrando las tecnologías emergentes de fusión y análisis de datos multitemporales que ofrecen la moderna Ingeniería Geomática y el procesamiento de imágenes digitales. Se persigue desarrollar metodologías que nos permitan la mejora de la eficiencia y precisión (vía automatización) en la captación y compilación de datos georreferenciados relativos a la línea de costa, modelo digital del terreno, edificaciones y vegetación. A partir de dichos resultados puede modelarse la evolución temporal de la línea costera y la dinámica de la erosión-acreción en la franja litoral. Dicha evolución puede relacionarse mediante técnicas de estadística espacial con la dinámica de sellado del terreno debido a la proliferación de urbanizaciones e infraestructuras costeras detectadas y cartografiadas de forma automática a partir de imágenes aéreas y filtrado de nubes de puntos láser. El desarrollo y evaluación de un modelo estocástico secuencial permitirá la generación de mapas de riesgo y vulnerabilidad de la costa en relación a los procesos antrópicos. La extensión del modelo a otros escenarios, previa calibración del mismo, puede constituir una herramienta muy valiosa para ayudar a la planificación del desarrollo litoral y a la optimización de los usos del suelo de las zonas sensibles.

Por otra parte, la fase 4 de nuestra propuesta metodológica, dedicada al modelado y cálculo de riesgos de inundaciones en la zona piloto, pretende proveer una base racional para el desarrollo de la política de gestión de estas situaciones extremas (*i.e.* gestión de recursos, prevención de rutas de desalojo, evaluación de la necesidad de construir infraestructuras de defensa, etc.). Los resultados derivados de este objetivo facilitarán una serie de conclusiones y recomendaciones de aplicación directa a la gestión urbanística y ordenación hidrológica de la zona piloto y de otras zonas costeras similares. La inclusión de modelos de ciudad 3D obtenidos con ALS puede incrementar ostensiblemente el realismo de la simulación al incrementar la rugosidad del contorno donde se produce el flujo y producir una probable pérdida de energía. La comparación de las simulaciones realizadas en ese escenario con las procedentes del empleo de un MDE donde se ha eliminado toda la información relativa al microrrelieve podría ser un argumento importante, a favor o en contra, en relación a la necesidad de disponer de modelos 3D de ciudades costeras.

En definitiva, los resultados esperados tras la aplicación de la metodología propuesta deben permitir el desarrollo de la tecnología necesaria para conocer lo que

está ocurriendo a nuestras costas. Resta la implementación de estos sistemas de monitoreo como una metodología continua de soporte a la toma de decisiones dentro de una política de Gestión Integrada de Áreas Costeras (GIAC).

#### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

ADAMS, J.C., CHANDLER, J.H., 2002, Evaluation of lidar and medium scale photogrammetry for detecting soft-cliff coastal change. *The Photogrammetric Record*, **17**(99), 405-418.

AGÜERA, F., AGUILAR, F. J., and AGUILAR, M. A., 2008, Using texture analysis to improve perpixel classification of very high-resolution images for mapping plastic greenhouses, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **63**(6), 635-646.

AGUILAR, M.A., AGUILAR, F.J., AGÜERA, F., CARVAJAL, F., 2005, The Evaluation of Close-range Photogrammetry for the Modelling of Mouldboard Plough Surfaces. *Biosystems Engineering*, **90** (4), 397–407.

AGUILAR, M.A., AGUILAR, F.J., AGÜERA, F., SÁNCHEZ, J.A., 2007, Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **73**(12), 1321-1332.

AGUILAR, F.J., AGÜERA, F., AGUILAR, M.A., 2007, A theoretical approach to modeling the accuracy assessment of digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **73**(12), 1367-1380.

AGUILAR, F.J., AGUILAR, M.A., AGÜERA, F., 2007, Accuracy assessment of digital elevation models using a non-parametric approach. *International Journal of Geographical Information Science*, **21**(6), 667-686.

AGUILAR, F.J., CARVAJAL, F., AGUILAR, M.A., AGÜERA, F., 2007, Developing digital cartography in rural planning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, **55**(2), 89-106.

AGUILAR, F.J., MILLS, J.P., 2008, Accuracy assessment of lidar-derived digital elevation models. *The Photogrammetric Record*, **23**(122), 148-169.

ALONSO, I, CABRERA, L.L., JIMÉNEZ, J.A, VALDEMORO, H.I., SÁNCHEZ, I, 2007, Aplicación de la fotogrametría a estudios de erosión costera. In *Actas del XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mar del Plata, Argentina,* 2007.

ANSELIN, L., 1998. *Exploratory Spatial Data Analysis in Geocomputational Environment*. John Wiley & Sons.

BAATZ, M., BENZ, U., GEHGHANI, S., NEYNEN, M., HOLTJE, A., HOFMANN, P., LINGENFELDER, I., MIMLER, M., SOHLBACH, M., WEBER, M., and WILLHAUCK, G., 2001, *eCognition object oriented image analysis, user guide*, Definiens Imaging, Munich, Alemania.

BAILY, B., NOWELL, D., 1996, Techniques for monitoring coastal change; a review and case study. *Ocean and Coastal Management*, **32**, 85-95.

BATES, P.D., DE ROO, A.P.J., 2000. A simple raster-based model for foodplain inundation. *Journal of Hydrology*, **236**, 54-77.

CROUS, A., PINTÓ, J., 2006, Evolución de la playa de Sa Riera (Cap de Begur, Costa Brava) en los últimos 50 años. *Investigaciones geográficas*, **39**, 119-130.

DOMÍNGUEZ, L., GRACIA, F.J., 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). *Rev. Soc. Geol. España*, **17** (1-2): 71-86.

DI, K., MA, R., LI, R., 2003, Geometric processing of Ikonos stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**(8), 873-879.

DOLAN, R., HAYDEN, B.P., MAY, P., MAY, S., 1980, The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, **48**, 22-29.

DOLAN, R., FENSTER, M.S., HOLME, S.J., 1991a, Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, **7**(3), 723-744.

DOLAN, R., FENSTER, M.S., HOLME, S.J., 1991b, Spatial analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, **8**(2), 263-285.

GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O., 1999. Status of automatic calibration for hydrological models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrology Engineering ASCE*, **4**(2): 135–143.

HALL, J.W., MEADOWCROFT, I.C., LEE, E.M., VAN GELDER, P.H., 2002. Stochastic simulation of episodic soft coastal cliff recession. *Coastal Engineering*, **46**, 159-174.

HALL, J.W., DAWSON, R.J., SAYERS, P.B., ROSU, C., CHATTERTON, J.B., DEAKIN, R., 2003. A methodology for national-scale flood risk assessment. *Water and Maritime Engineering*, **156**(3), 235-247.

HORRIT, M.S., BATES, P.D., 2001. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, **253**, 239-249.

JAMES, T.D., MURRAY, T, BARRAND, N.E., BARR, S.L., 2006, Extracting photogrammetric ground control from lidar DEMs for change detection. *The Photogrammetric Record*, **21**(116), 312-328.

JIMÉNEZ, J.A., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., BOU, J., ORTIZ, M., 1997, Analysing short-term shoreline changes along the Ebro delta (Spain) using aerial photographs. *Journal of Coastal Research*, **13**, 1256-1266.

KETTING, R. L., AND LANDGREBE, D. A., 1976, Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **1**, 19-26.

KIM, T., LEE, T. Y., AND KIM, K. O., 2006, Semiautomatic building line extraction from Ikonos images through monoscopic line analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **72**, 541-549.

LEE, J. Y., and WARNER, T. A., 2006, Segment based image classification. *International Journal of Remote Sensing*, **27**(16), 3403-3412.

LEE, S. D., SHAN, J., AND BETHEL, J., 2003, Class-guided buildings extraction from Ikonos imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**(2), 143-150.

LONGLEY, P., 2001. Foundations in Geocomputation. John Wiley & Sons.

MANZANO, G., MUÑOZ, A., 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. In *XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Actas del Congreso, Zaragoza-Huesca España*, 2004.

MAYER, H., 1999, Automatic object extraction from aerial imagery –A survey focusing on buildings. *Computer Vision and Image Understanding*, **74**(2), 138-149.

MAYUNGA, S. D., COLEMAN, D. J., and ZANG, Y., 2007, A semi-automated approach for extracting buildings from QuickBird imagery applied to informal settlement mapping. *International Journal of Remote Sensing*, **28**(10), 2343-2357.

MILIARESIS, G., and KOKKAS, N., 2007, Segmentation and object-based classification for extraction of the building class from LIDAR DEMs, *Computer and Geoscience*, **33**: 1076-1087.

MILLS, J.P., BUCKEY, S.J., MITCHELL, H.L., 2003, Synergistic fusion of GPS and photogrammetrically generated elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**(4), 341-349.

MILLS, J.P., BUCKEY, S.J., MITCHELL, H.L., CLARKE, P.J., EDWARDS, S.J., 2005, A geomatics data integration technique for coastal change monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, 651-664.

MILLER, P., MILLS, J.P., EDWARDS, S., BRYAN, P., MARSH, S., HOBBS, P., MITCHELL, H.L., 2007, A robust surface matching technique for integrated monitoring of coastal geohazards. *Marine Geodesy*, **30**, 109-123.

O'BRIEN, J.S., ZHAO, B., 2004. Real Time Rainfall-Runoff Modeling on Alluvial Fans, Floodplains and Watersheds. *ASCE World Water & Environmental Resources Congress - Arid Lands Symposium*, Salt Lake City, Utah.

O'BRIEN, J. S. 2005. Modeling Tsunami Waves and Ocean Storm Surges with FLO-2D®. *American Water Resources Association, 2005 Summer Specialty Conference, Institutions for Sustainable Watershed Management*, Honolulu, Hawaii.

OJEDA, J., 2000, Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos de España*, **30**, 103-118.

OJEDA, J., CABRERA, A., 2006, Utilidades y funcionalidades de un visor tridimensional interactivo en la gestión del litoral (SIGLA: Sistema de Información Geográfica del Litoral de Andalucía). *Cuadernos Geográficos*, **39**(2006-2), 41-52.

REEV, D.E., 1998, Coastal flood risk assessment. ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, **124**(5), 219-228.

RICHARDS, J.A., 1986, *Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction.* Springer-Verlag, Berlin.

SENCIALES, J.M., MALVÁREZ, G., 2003, La desembocadura del río Vélez (Provincia de Málaga, España). Evolución reciente de un delta de comportamiento mediterráneo. *Rev. C. & G.*, **17**(1-2), 47-61.

SOARES, A., 2000, Geoestatistica para as Ciencias da Terra e do Ambiente. IST Press.

SOHN, G., DOWMAN, I., 2007, Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**, 43-63.

TULLIS, J. A., JENSEN, J. R., 2003, Expert system house detection in high spatial resolution imagery using size, shape, and context. *Geocarto International*, **18**(1): 5-15.

WALTER, N., 2001. Spatial interpolation. University of Calgary, Canada.

WANG, L., SOUSA, W., GONG, P., BIGING, G. S., 2004, Comparison of Ikonos and QuickBird images for mapping mangrove species on the caribean coast of Panama. *Remote Sensing of Environment*, **91**, 432-440.

WOODROFFE, C.D., 2002. *Coasts: form, process and evolution.* Cambridge University Press, Cambridge.

ZANUTTA, A., BALDI, P., BITELLI, G., CARDINALI, M., CARRARA, A., 2006, Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. *Annals of Geophysics*, **49**(4/5), 1067-1080.

ZHENG, D., WALLIN, D.O., HAO, Z., 1997, Rates and patterns of landscape change between 1972 and 1988. in the Changbai Mountain area of China and North Korea. *Landscape Ecology*, **12**, 241-254.

ZUG, M. L., PHAN, D. B., SCRIVENER, O., 1999, Pollution wash-off modelling on impervious surfaces: calibration, validation, transposition, *Water Science and Technology*, **39**(2): 17-24.