

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de una metodología para el estudio de la
morfología de playas basado en mapas auto-organizativos de
imágenes digitales.

Presentada por: **OMAR QUETZALCÓATL GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ**

Dirigida por: **ERNESTO MAURICIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**
RAÚL MEDINA SANTAMARÍA

Santander, julio 2011

A la memoria de mi Padre.

A Ana,

*A mi madre Carmen,
y a mi hermano Eduardo.*

Agradecimientos

El trabajo que aquí presento, es producto del apoyo y colaboración de mucha gente e instituciones, a todos ellos agradezco. En primer lugar tengo que agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Fundación Carolina por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de doctorado a través de una Beca de convenio con número de registro 142218.

Agradezco a mis directores, Raúl Medina y Mauricio González, por dirigir esta tesis, sin sus recomendaciones, comentarios, opiniones, tiempo y consejos habría sido imposible realizarla. También agradezco a Fernando Méndez y a José M. Gutiérrez, por introducirme al mundo de los SOMs, su ayuda y consejos resultaron indispensables para conseguir los resultados de este trabajo. A Andrés Osorio, por sus consejos y ayuda en la manipulación y análisis de las imágenes digitales. También quiero agradecer al Coastal Ocean Observatory del ICM (CSIC) de Barcelona (España) por proporcionarme las imágenes de la playa de Barceloneta.

También agradezco al grupo en general, puesto que el ambiente de trabajo, los consejos, opiniones, ayudas, etc, siempre han sido abundantes, positivas y enriquecedoras para el trabajo. En particular a aquellos más cercanos, con los que no solo compartí tiempo de trabajo, y que siempre han sido un apoyo y me han brindado ánimos para conseguir esta meta, aunque algunos ya no están por aquí, algunos nombres que recuerdo: Gabriel Arcos, Alec, Gaby, Gabo, Elena, María, Lucia, Paula, Antonio, Melisa, Imen, Nabil, Cynthia, Pedro, Antonio, Jaime, Susana, Vero, Pablo, Damaso y

muchos más que ahora se me escapan.

Agradezco a mis dos familias. En especial a la que esta en México, pues aún con la distancia y el tiempo lejos, siempre los he sentido cerca, siempre he sentido su apoyo, su amor, amistad y comprensión. Mis padres Carmen y Jesús, siempre están en mis pensamientos: Gracias por todo. A mi hermano, gracias por ser mi hermano y mi amigo, gracias por esas ganas enormes de hacer grandes cosas, gracias por esa actitud, por la confianza, por todo y porque escalando siempre se va más arriba. A mis primos y tíos, también gracias. Mi segunda familia, primero adoptiva y después política, aquí en España: Gracias por recibirme, aceptarme, apoyarme y adoptarme, a mis suegros Susi y Chita, los de Santoña, Berna, Conchi, Inma, Javi, Noeli, Antonio, Araceli, y Sevi, los que están en Madrid Susi, Ana, Paula y Lara, gracias a todos. Muy especialmente a Ana, por todo el tiempo, esfuerzo, apoyo, comprensión, paciencia, compañía, cariño y amor, sin ti jamás lo habría conseguido.

A mis amigos aquí en Santander, que con su tiempo, compañía, y amistad han conseguido que el tiempo que he pasado fuera de la universidad sea más agradable, alegre, llevadero y sobretodo ajeno a la universidad y a esta tesis. Mabel, Carlos, Maite, Alejo, Agustina, Javi, Mayca, Carlos, gracias por permitirme ser su amigo.

Resumen

La presente tesis doctoral tiene como objetivo explorar la viabilidad de aplicar Mapas Auto-Organizativos (SOMs) en el estudio de la morfodinámica de playas a partir de imágenes digitales. Para cumplir estos objetivos, primero, se ha realizado una extensa revisión del estado del arte, tanto, de las imágenes digitales de playa (IMDP), de la forma de obtención, características, procesamiento requerido para obtener imágenes que representen las morfología de una playa, así como de los SOMs, el planteamiento teórico, su aplicación en diferentes áreas, y las aplicaciones a la clasificación de imágenes digitales, entre las que destacan las aplicaciones PicSOM y aiSOMPic.

Posteriormente se han diseñado y realizado experimentos para determinar el comportamiento de los parámetros utilizados en la bibliografía en la clasificación de IMDP, así como de métricas apropiadas para la clasificación de imágenes. Los experimentos realizados incluyen procesamientos para descartar el efecto de las variaciones del nivel del mar y la restricción de la IMDP a la zona de interés. Más adelante se han realizado entrenamientos usando los parámetros utilizados por las aplicaciones antes mencionadas. Estos parámetros, puesto que están basados principalmente en los valores de color, no resultaron adecuados, ya que la clasificación obtenida es debida a los tonos de las IMDP que a su vez son controlados por variaciones horarias o meteorológicas principalmente. Las mejores clasificaciones se obtienen utilizando como parámetro de entrenamiento los valores de intensidad (tonos de gris) ecualizados y una vez separados los histogramas de tierra-agua. En cuanto a la métrica se han considerado medidas de similitud de alto y bajo orden de complejidad. Las medidas de alto orden de complejidad se descartaron

debido al elevado tiempo de cálculo requerido para realizar cada iteración del entrenamiento. Entre las medidas de bajo orden, la correlación proporcionó ligeras mejoras en cuanto a la clasificación obtenida usando la distancia euclidiana.

Una vez determinadas las condiciones más adecuadas para realizar la clasificación de las IMDP se planteo una metodología de trabajo que puede ser aplicada a cualquier colección de IMDP. La metodología incluye tres partes, en la primera las IMDP son preparadas para el entrenamiento, esto incluye la selección del área de interés, la eliminación de los efectos de la marea, la transformación de imágenes de color a valores de intensidad, la ecualización y la separación de los histogramas. La segunda parte corresponde al entrenamiento del mapa y finalmente se reconstruye una serie de evolución.

La metodología diseñada se utilizó para analizar las colecciones de imágenes de dos playas. La primera, El Puntal en Santander, que es una playa macromareal en la que se forman barras, y la segunda, La Barceloneta en Barcelona, que es una playa micromareal para evaluar la variación de la posición de la línea de costa

En el caso de la playa del Puntal, la clasificación óptima se encontró usando un mapa de 11×11 unidades, con un error medio del 22 %, sin embargo este se redujo, hasta un 10 %, por medio de una inspección visual solo en los grupos donde el error se localizaba. A los grupos del mapa les fue asignando un estado morfodinámico del modelo de *Wright y Short* (1984) y se reconstruyó la serie de evolución. Se encontró que los estados más frecuentes son los intermedios, *RBB* con 23 %, *TBR* el 25 % y *LTT* el 21 % del tiempo analizado. El estado *reflejante* se mantiene durante un 15 % y los estados energéticos *Disipativo* y *LBT* se mantienen durante un 8 % del tiempo cada uno. Se realizó una clasificación visual de las IMDP y se encontró una correlación del 88 % entre ambas series, con la diferencia que en la serie obtenida de los SOMs solo se clasificaron 121 IMDP mientras que en la visual se analizaron 580 IMDP.

En la playa de Barceloneta, se encontró la clasificación más adecuada usando un mapa de 8×7 unidades. A este mapa, ya que el numero de prototipos es pequeño y para observar pequeñas variaciones, se determinó a cada prototipo una línea de costa.

La línea de costa se determinó digitalizando directamente la costa desde el prototipo, aunque cualquier técnica puede ser aplicada aquí. El porcentaje en que la línea de costa del prototipo no representa a las IMDP clasificadas es de un 7%, estas, ya que se encuentran distribuidas aleatoriamente y por simplicidad, fueron descartadas de los resultados. Para determinar la precisión de la línea de costa asignada a cada IMDP, se seleccionaron aleatoriamente un 10% de las imágenes, a las que se determinó nuevamente la línea de costa usando el mismo método y se compararon los resultados. Se encontró que la diferencia promedio entre ambas líneas de costa es menor a 5 *mts*. Con los resultados de la técnica se encontró que la playa estacionalmente tiene avances y retrocesos del orden de los 10 *mts*, también se detectaron los rellenos realizados en 2004 y 2006, así como los cambios producidos por la construcción del dique exento al final del periodo analizado.

Índice

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Índice	XI
Lista de Figuras	XXV
Lista de tablas	XXVII
Lista de Símbolos	XXIX
1. Introducción	1
1.1. Exposición de motivos	1
1.2. Objetivos Generales	3
1.3. Estructura del trabajo	4
2. Sistemas de adquisición de imágenes en zonas costeras en la playa del Puntal y de Barcelona	7
2.1. Antecedentes del uso de imágenes digitales en la zona costera	7
2.2. Estaciones de cámaras digitales	9
2.2.1. Estación de Santander	11
2.2.2. Estación de Barcelona	13
2.3. Procesamiento de imágenes	13

3. Aplicación de Mapas Auto-Organizativos para identificación y clasificación de imágenes	17
3.1. Introducción	17
3.2. Estado del arte	19
3.3. Planteamiento teórico	19
3.3.1. Descripción de los SOMs	19
3.3.2. Entrenamiento de un mapa	22
3.4. Aplicación en la clasificación de imágenes digitales	23
3.4.1. Introducción	23
3.4.2. Características de los SOMs en la clasificación de imágenes . . .	24
3.4.2.1. Parámetros a clasificar	24
3.4.2.2. Métricas	26
3.5. Implementación de los SOMs	29
3.5.1. Ejemplos	29
3.6. Conclusiones	35
4. Implementación de SOMs para detectar características morfológicas en imágenes digitales de playa (IMDP)	39
4.1. Introducción	39
4.2. Preparación de las IMDP	40
4.2.1. Selección del área de análisis	40
4.2.2. Efectos de la variación del nivel del mar en las IMDP	42
4.3. Entrenamientos basados en los parámetros usados en PicSOM y aiSOMPic	45
4.3.1. Momentos espectrales del color (<i>mec</i>)	45
4.3.2. Momentos espectrales del color en secciones de la imagen (<i>mecs</i>)	46
4.3.3. Histograma de colores (<i>hc</i>)	47
4.3.4. Textura	48
4.3.5. Análisis de resultados	50
4.4. Imágenes Digitales de intensidad como parámetros de entrada	52
4.4.1. Procesamiento de IMDP de intensidad	52

4.4.1.1.	Ecualización de imágenes	53
4.4.1.2.	Separación de histogramas tierra - agua	54
4.4.2.	Entrenamiento de un SOM	57
4.4.2.1.	Evaluación de los entrenamientos	57
4.4.2.2.	Entrenamientos	59
4.5.	Medidas de similitud entre imágenes digitales	61
4.5.1.	Entrenamientos	62
4.5.2.	Análisis de los entrenamientos	64
4.6.	Conclusiones	64
5.	Planteamiento de una metodología para clasificar una colección de IMDP según las características morfológicas	67
5.1.	Introducción	67
5.2.	Desarrollo metodológico	68
5.2.1.	Procesamiento de IMPD	69
5.2.2.	Entrenamiento de los SOMs	70
5.2.2.1.	Selección del tamaño del mapa	71
5.2.2.2.	Determinación de prototipos	74
5.2.2.3.	Evaluación de los entrenamientos	74
5.2.3.	Reconstrucción de una serie de evolución	75
5.2.3.1.	Clasificación y formación de supergrupos	75
5.2.3.2.	Construcción de una serie de evolución	76
5.2.3.3.	Evaluación de la serie	76
5.3.	Metodología final	81
5.4.	Conclusiones	84
6.	Estudio de la Evolución Morfodinámica de la Playa del Puntal	87
6.1.	Introducción	87
6.2.	Área de estudio y colección de IMPD	88
6.2.1.	Caracterización del área	88
6.2.2.	Colección de IMPD	91

6.3. Metodología	91
6.4. Obtención del mapa	93
6.5. Análisis de la serie de evolución morfodinámica	105
6.6. Determinación de la evolución morfodinámica de la playa de la forma tradicional a partir de las IMDP	109
6.7. Análisis de las series obtenidas	111
6.8. Conclusiones	116
7. Análisis de la evolución de la línea de costa de la Playa de Barceloneta en Barcelona	117
7.1. Introducción	117
7.1.1. Objetivo	119
7.2. Descripción del área	119
7.2.1. Características dinámicas	119
7.3. Colección de imágenes	121
7.4. Metodología	121
7.5. Entrenamientos	122
7.5.1. Procesamiento de IMDP	122
7.5.2. Entrenamiento de mapas	125
7.5.3. Determinación de series de evolución	128
7.6. Análisis del mapa obtenido y Series de evolución	133
7.7. Conclusiones	137
8. Conclusiones y futuras líneas de investigación	139
8.1. Conclusiones	139
8.2. Futuras líneas de investigación	143
A. Modelo de Wright y Short (1984)	147
A.1. Playa disipativa	148
A.2. Estado de playa con barra longitudinal y seno	148
A.3. Estado de playa y barra rítmicas	150

ÍNDICE

A.4. Estado de playa con barras transversales y corrientes de retorno	151
A.5. Estado de playa con terraza de bajamar	152
A.6. Playa reflejante	152
B. SOM Toolbox	155
B.1. Implementación de SOMs	155
B.1.1. Preparación de los datos	155
B.1.2. Entrenamiento de un mapa SOM	157
B.1.3. análisis de resultados	158
Bibliografía	161

Lista de Figuras

1.1. Ejemplo de una imagen digital de una playa donde es identificable la posición de la línea de costa, la posición y forma de las barras, así como canales de corrientes de retorno.	3
2.1. Tipos de imágenes ARGUS. En la parte superior se muestra una imagen instantánea o <i>SnapShot</i> , al centro una imagen promedio o <i>Timex</i> y abajo una imagen de varianza o <i>variance</i>	10
2.2. Localización de las cámaras en la ciudad de Santander. A la izquierda se muestra un detalle de la batería de cámaras utilizada para observar la playa del Puntal.	11
2.3. Vista de la playa del Puntal, obtenida mediante las 4 cámaras ARGUS instaladas en Santander. Las secciones captadas por cada cámara aparecen indicadas como: C1, C2, C3 y C4.	12
2.4. Distribución espacial de la resolución de las imágenes <i>long-shore</i> (arriba) y <i>cross-shore</i> (abajo).	12
2.5. Vista en planta del conjunto de IMDP unidas y rectificadas de las playas de Barcelona. Se indica la localización de la playa de la Barceloneta.	13
2.6. Relación co-lineal entre la coordenadas de la cámara (x_c, y_c, z_c) , la imagen (u, v) , y la zona de estudio (x, y, z) . Además los ángulos de rotación (ϕ, τ, σ) usados en la definición de la orientación.	14
2.7. Ejemplo de imagen rectificada. En la parte superior se muestra una de las IMDP del Puntal correspondiente al 7 de julio del 2006. En la parte inferior se muestra el resultado de la rectificación de la IMDP.	15

2.8. Ejemplo del resultado obtenido a partir de la combinación de las imágenes de cuatro cámaras en la Playa del Puntal, Santander. En la imagen superior, las cuatro imágenes sin combinar. En la imagen intermedia, panorámica con imágenes combinadas. Finalmente, en la imagen inferior, la vista en planta rectificadas. 16

3.1. Esquema típico de un Mapa Auto-Organizativo. 20

3.2. Comparación entre el procedimiento de clasificación de documentos en un archivador y el entrenamiento de una colección de IMDP en un SOM. 21

3.3. Visualización de los SOMs de *Iris* data. a) Mapa de distancias entre unidades; b), c), d) y e) muestran los mapas de distancia entre las variables longitud L y ancho W del cáliz *Sepal* y pétalo *Petal*. El gráfico f) muestra un mapa con las etiquetas de cada unidad. 30

3.4. Proyección del espacio de los SOMs. Las tres subespecies se muestran de distinto color. La malla se ha proyectado en el mismo subespacio. 31

3.5. El mapa entrenado, donde los colores indican la localización de las subespecies, mientras que los histogramas los valores en cada unidad. 32

3.6. Visualización del mapa entrenado del ejercicio 2. El panel a) muestra las distancias entre las unidades. Los paneles b), c) y d) muestran las relaciones entre las variables y su disposición en el mapa. 33

3.7. En el panel se muestran las etiquetas que identifican a cada grupo: G verde, W blanco, C azul celeste, B azul, K negro, Y amarillo, R rojo y M rosa 34

3.8. Visualización del mapa del ejercicio 3. El panel a) muestra las distancias entre las unidades. Los paneles b), c) y d) muestran las relaciones entre las variables y su disposición en el mapa. 35

4.1. Imagen ARGUS típica de la playa del Puntal en Santander. En el recuadro rojo se indica la zona a considerar. 41

4.2. Resultado de eliminar de la imagen ARGUS original el área indicada en la figura 4.1. 41

4.3. Resultado de girar la imagen recortada de la figura 4.2. Los ejes de la imagen se giraron 18° . Nuevamente el recuadro indica la zona de la playa que muestra características de la morfodinámica y por lo tanto la zona de la imagen que se desea conservar.	42
4.4. Resultado final de eliminar y girar la imagen ARGUS de la Playa del Puntal.	42
4.5. Serie de marea para el periodo en que se cuenta con IMDP del Puntal. La serie se obtuvo utilizando las constantes armónicas del Puerto de Santander.	43
4.6. Cambios morfológicos aparentes en las IMDP debidos al efecto de la variación del nivel del mar en un ciclo de marea.	44
4.7. Distribución de IMDP por nivel de marea. Se indica el nivel η_i que se corresponde al nivel con mayor ocurrencia de IMDP en la parte de bajamar del ciclo de marea.	44
4.8. Resultados obtenidos del entrenamiento de un mapa de 5×5 con los momentos espectrales de color. El mapa muestra la IMDP más cercana al prototipo de cada unidad.	45
4.9. Resultados obtenidos del entrenamiento de un mapa de 5×5 con los momentos espectrales de color obtenidos en secciones. El mapa muestra la IMDP más cercana al prototipo de cada unidad. La unidad 1 del mapa se encuentra localizada en la esquina inferior izquierda y la 25 en la esquina superior derecha.	46
4.10. Se muestran algunas IMDP contenidas en la unidad superior izquierda del mapa entrenado usando <i>mecs</i>	47
4.11. Resultados obtenidos del entrenamiento de un mapa de 5×5 usando como vector de datos el histograma de la imagen. El mapa muestra la IMDP más cercana al prototipo de cada unidad. La unidad 1 del mapa se encuentra localizada en la esquina inferior izquierda y la 25 en la esquina superior derecha.	48
4.12. Se muestran algunas IMDP contenidas en la unidad 24 del mapa entrenado usando <i>hc</i>	49

4.13. Resultados obtenidos del entrenamiento de un mapa de 5×5 usando como vector de datos la textura de la imagen. El mapa muestra la IMDP más cercana al prototipo de cada unidad. La unidad 1 del mapa se encuentra localizada en la esquina inferior izquierda y la 25 en la esquina superior derecha. 50

4.14. Se muestran algunas IMDP agrupadas en la unidad 3 del mapa entrenado . 51

4.15. Ecuación de una imagen ARGUS. La imagen corresponde al 11 de octubre del 2003 a las 8:00 am. En la parte superior se observa la imagen original en color, en la parte central e inferior en tonos de gris. A la derecha se observa los histogramas de intensidad para cada figura. La imagen central corresponde a la imagen de intensidad original, nótese como en el histograma solo los niveles por encima de 200 tienen energía en la imagen. Por el contrario, en la parte inferior, la imagen ecualizada, presenta la energía distribuida en todos los niveles del espectro. 54

4.16. Ejemplo en el que la transformación de tonos de grises y la ecualización de las IMDP produce dos grupos de imágenes, en el primero (izquierda) la playa tiene tonos oscuros y el agua claros y en el segundo (derecha) ocurre lo contrario. 55

4.17. Distribución de la intensidad para cada píxel i de la colección de IMDP. . . 56

4.18. Valores más frecuentes de intensidad para cada posición de píxel en la colección de IMDP. Se indica la posición de los puntos representativos de tierra (1) y agua (2). 56

4.19. Distribución de densidades para los puntos de tierra y agua señalados en la figura 4.18. Se indica la intensidad de corte. 57

4.20. Distribución de densidades para los puntos de tierra y agua, una vez descartadas las IMDP indicadas. 58

4.21. Área seleccionada de las IMDP para ser entrenada. Esta área fue seleccionada como representativa de la variabilidad morfológica de la playa. 59

4.22. Histogramas de E_{p_k} para las clasificaciones obtenidas usando IMDP al 90 %, 80 % y 60 % de su resolución original. La métrica utilizada es DE y el mapa tiene dimensiones 10×10 60

4.23. Resumen de las métricas implementadas a la técnica.	61
4.24. Histogramas de E_{pc} para las clasificaciones obtenidas usando el 90 %, 80 % y 60 % de resolución de las IMDP y correlación como métrica en un mapa de 10×10 unidades.	63
5.1. Se indican los tres elementos a considerar en el planteamiento de una metodología de clasificación de IMDP por medio de SOMs.	68
5.2. Se indican los valores posibles de K_{max} como función del numero de IMDP, n y el numero de píxeles por IMDP, r y considerando una $M_{max} = 1 GB$	72
5.3. Escala de tamaños de mapas.	73
5.4. Ejemplo de un error sistemático típico de la técnica. En la serie se observa un valor atípico producto de una IMDP mal clasificada	77
5.5. Ejemplo de aplicación de un filtro modal a una serie para corregir el error sistemático. a) una serie artificial que muestra la evolución de una variable entre 5 estados; en b) la serie original fue alterada en un 10 % de los elementos, simulando el error sistemático obtenido en la clasificación de las IMDP en un SOM; c) muestra la serie obtenida después de aplicar un filtro modal de 5 días y en d) se muestra el residuo entre ambas series.	79
5.6. Ejemplo de un error aleatorio. Se muestran tres series obtenidas de entrenar mapas de distintos tamaños y con distintos supergrupos, por lo que la evolución que muestra cada serie es distinta.	80
5.7. representación esquemática de la metodología.	85
6.1. Localización de la playa del Puntal en la Bahía de Santander. Tomada de Google Earth	89
6.2. Localización de la Bahía de Santander y la playa del Puntal. Tomada de Google Earth	90
6.3. Localización de las estaciones de granulometría en la Playa del Puntal.	90
6.4. Modelo de <i>Wright y Short</i> (1984). Adaptado de <i>Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Univesidad de Cantabria</i>	92

6.5. Escala de tamaños posibles de mapas para entrenar la colección de IMDP de la playa del Puntal.	95
6.6. Mapa entrenado de 7×7 unidades. Para cada unidad se muestra la IMDP prototipo.	96
6.7. Distribución de unidades del SOM de 7×7 unidades según el numero de IMDP agrupadas por unidad.	97
6.8. Mapa entrenado de 9×9 unidades. Para cada unidad se muestra la IMDP prototipo.	98
6.9. Distribución de unidades del SOM de 9×9 según el numero de IMDP agrupadas por unidad.	98
6.10. Características morfológicas observadas en los prototipos utilizadas para definir los estados morfodinámicos.	99
6.11. Supergrupos formados en el mapa 9×9 de SOM entrenado. El estado asignado a cada unidad del mapa se indica por el símbolo localizado en la esquina superior izquierda de cada unidad.	100
6.12. Serie de evolución morfodinámica obtenida directamente a partir del mapa de 9×9	101
6.13. Serie de evolución morfodinámica resultado de la aplicación de un filtro modal de longitud de 10 días.	101
6.14. Mapa de 11×11 entrenado. Se indican los supergrupos formados.	102
6.15. Serie de evolución morfodinámica obtenida a partir del mapa entrenado de 11×11	103
6.16. Selección de IMDP del invierno 2002-2003 que describen los cambios morfológicos de la playa durante este periodo.	105
6.17. Selección de IMDP de enero del 2006 que describen los cambios morfológicos de la playa durante este periodo.	106
6.18. Selección de IMDP de la primavera 2006 que describen los cambios morfológicos de la playa durante este periodo.	107
6.19. Serie de evolución morfodinámica obtenida a partir del mapa de 11×11 y corregida con un filtro modal de 10 días.	108

6.20. Histograma de distribución de los estados morfodinámicos según la clasificación final obtenida.	108
6.21. Interfaz gráfica utilizada en la determinación visual del estado morfodinámico de la playa del Puntal.	111
6.22. Serie de evolución morfodinámica obtenida por medio de la interfaz gráfica. .	111
6.23. Histograma de distribución de los estados morfodinámicos según la clasificación visual.	112
6.24. Comparación entre las series de evolución morfodinámica detectada por medio de SOMs y visualmente.	113
6.25. Correlación entre SOM y visual.	114
6.26. Comparación entre la clasificación obtenida del mapa y visualmente para los estados <i>RBB</i> , <i>TBR</i> y <i>LTT</i> . En la serie se indican cuatro puntos de la serie en los que existe discrepancia entre ambas clasificaciones. Abajo se muestran IMDP de los puntos señalados.	115
6.27. Comparación entre la clasificación obtenida del mapa y visualmente para los estados <i>RBB</i> , <i>LBT</i> y <i>Disipativo</i> . En la serie se indican cuatro puntos de la serie en los que existe discrepancia entre ambas clasificaciones. Abajo se muestran IMDP de los puntos señalados.	115
7.1. Ubicación de la playa de la Barceloneta, en Barcelona, España.	120
7.2. Nivel del mar (cm) en la zona de la playa de la Barceloneta.	120
7.3. Ejemplo de IMDP de la Barceloneta.	122
7.4. Ajuste y giro de 290° en una IMDP de la zona de la Barceloneta.	123
7.5. Se indican las bandas de píxeles seleccionadas de cada IMDP a usar como parámetros de entrada en los entrenamientos de los SOMs.	124
7.6. Se muestran solamente las bandas seleccionadas para los entrenamientos. También se indican los píxeles elegidos como característicos de las zonas de playa seca y mar.	124

7.7. Al lado derecho se muestran la distribución de los valores de intensidad de los píxeles de playa seca P_t y mar P_a , así como la intensidad de corte Y_c entre ambas distribuciones. Al lado derecho se muestran las distribuciones obtenidas al aplicar el corte a las distribuciones originales. 125

7.8. Mapa de prototipos obtenido del entrenamiento de un SOM de 5×4 unidades. 126

7.9. Mapa de prototipos obtenido del entrenamiento de un SOM de 9×8 unidades..127

7.10. Líneas de costa medidas de los prototipos del mapa entrenado de 8×7 129

7.11. Fallos típicos encontrados en la clasificación de IMDP de la Barceloneta en función de la posición de la línea de costa. A la izquierda en la IMDP del 21/06/06 la línea de costa asignada a través del mapa esta adelantada con respecto a la línea de costa real. A la derecha, en la IMDP del 18/07/06 ocurre lo contrario, la línea de costa asignada en el mapa se encuentra por detrás de la posición real de la costa. 130

7.12. Se muestran 4 ejemplos donde se la posición de la coordenada perpendicular de la línea de costa asignada en el SOM, Y_s , y la medida, Y_r . También se indican las diferencias encontradas entre ambas mediciones. En ninguno de los casos se encontraron diferencias menores a los 10 *mts* y la diferencia cuadrática media es menor a los 5 *mts*. 131

7.13. Reconstrucción de la evolución de la línea de costa en la playa de la Barceloneta. Los tonos indican la posición de la coordenada perpendicular, Y a la línea de costa en función de la coordenada paralela a la misma, X , a lo largo del periodo analizado. El eje horizontal tiene una orientación aproximada Norte-Sur. 132

7.14. Formas típicas encontradas en la playa de la Barceloneta, en el periodo 2004-2006. 133

7.15. Variación neta de la línea de costa, \hat{Y} , en la playa de la Barceloneta, obtenida haciendo $\hat{Y} = Y(X) - \bar{Y}$. Los tonos indican los valores de \hat{Y} en *mts* en función de la coordenada paralela a la misma, X , a lo largo del periodo analizado. Los tonos verdes indican acreción y los rojos erosión de la línea de costa. El eje horizontal tiene una orientación aproximada Norte-Sur. 135

7.16. Variación neta de la línea de costa, \hat{Y} , en la playa de la Barceloneta, obtenida haciendo $\hat{Y} = Y(X) - \bar{Y}$. Los tonos indican los valores de \hat{Y} en *mts* en función de la coordenada paralela a la misma, X . A diferencia de la figura anterior, la primavera y el verano del 2006 no son incluidos para resaltar las variaciones previas a este periodo. Los tonos verdes indican acreción y los rojos erosión de la línea de costa. El eje horizontal tiene una orientación aproximada Norte-Sur. se indican algunos de los principales procesos observados: 1) zona de acreción en la zona norte de la playa, 2) Periodo de erosión ocurrido a lo largo de toda la linea de costa, 3) Basculamiento de la playa, con transporte de la zona norte al sur y 4) Una marcada estacionalidad en la zona sur de la playa. 136

A.1. Esquema del estado de una playa disipativa. Adaptado de WS84. 149

A.2. Esquema del estado de una playa con barra longitudinal. Adaptado de WS84. 149

A.3. Esquema del estado de una playa con barra rítmica. Adaptado de WS84. . . 150

A.4. Esquema del estado de una playa con barra transversales. Adaptado de WS84. 151

A.5. Esquema del estado de una playa con terraza de bajamar. Adaptado de WS84. 152

A.6. Esquema del estado de una playa reflejante. Adaptado de WS84. 153

B.1. Formato de la tabla de datos de entrada para el entrenamiento de una SOM.
 La tabla puede contener x_n^r variables en r muestreos. La única limitante es que para cada muestreo x_n^r debe de existir el mismo número de variables r . . . 156

Lista de tablas

4.1. Errores obtenidos en la clasificación usando como parámetro los valores Y de las IMDP a diferentes resoluciones. La métrica usada en el entrenamiento es ED	61
4.2. Tiempo de cálculo requerido para comparar dos IMDP, usando las métricas indicadas en la figura 4.23 en un procesador Pentium con 1Gb de RAM. También se indica el tiempo requerido para realizar un paso del entrenamiento de una colección de 581 IMDP en un mapa de 10×10 unidades y la proporción del tiempo requerido por cada métrica y la proporción $P = \frac{D}{CO}$, donde D son las distintas métricas usadas.	63
4.3. Errores obtenidos en la clasificación usando como métrica la correlación.	64
6.1. Datos granulométricos de la Playa del Puntal (fuente <i>Fundación Leonardo Torres Quevedo</i> (1990)).	91

Lista de Símbolos

- $\beta_{i,j}$ Vector de pesos asociado al centro de cada neurona, página 20
- η_i Nivel de marea seleccionado, página 44
- $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ matriz valores de intensidad por canal de color (rojo, verde y azul) de una imagen digital, página 25
- $\vec{x}_n = x_n^r$ Vector de datos de entrada a entrenar en un mapa, página 25
- $A = \{A_{i,j}\}$ y $B = \{B_{i,j}\}$ Imágenes digitales de dimensiones $i = 1, \dots, N$ y $j = 1, \dots, M$, página 26
- AD Distancia local, página 27
- CO Correlación, página 29
- d_{city} Distancia city, página 27
- E_g Error de clasificación general, página 58
- E_m Error medio. Proporción media de elementos corregidos al aplicar el filtro L_f a la serie $S_{t\cdot}$, página 78
- $E_s(t)$ Error de la serie. Proporción de elementos corregidos a cada aplicación del filtro L_f sobre un segmento de la serie $S_{t\cdot}$, página 78
- E_{pk} Error de clasificación por unidad del mapa, página 58
- E_{pm} Error medio de clasificación por unidad, página 58

-
- ED Distancia Euclidiana, página 29
- G Número de niveles de intensidad de una imagen, página 53
- GD Distancia global, página 27
- HG Distancia de Hausdorff, página 26
- I, J Número total de unidades en el SOM, página 20
- i, j Índice de posición en el SOM, página 20
- k Índice de posición de las unidades del mapa, página 22
- K_{max} Número máximo de unidades en un SOM, página 71
- K_{min} Número mínimo de unidades en el mapa, página 72
- L_f Longitud del filtro, página 77
- M_t Memoria total utilizada durante el entrenamiento de un SOM, página 71
- M_{max} Memoria máxima disponible para realizar el entrenamiento de una colección de IMDP, página 72
- $N \times M$ dimensiones de una imagen digital, página 53
- $nimg_k$ total de IMDP en la unidad k , página 59
- P Proporción del tiempo requerido para realizar un entrenamiento entre una métrica y la correlación, página 62
- P_r Píxel representativo de la zona de rotura, página 57
- P_t Píxel representativo de la zona de playa, página 57
- q_e Distancia media de cada vector a su respectivo prototipo, página 58
- r Numero de variables en cada conjunto de datos x_n , página 156

LISTA DE TABLAS

- r dimensiones de las variables a entrenar en el mapa, página 25
- $S(t)$ Serie de tiempo de un parámetro medido en las IMDP clasificadas en un mapa, página 78
- $S_e(t)$ Serie de tiempo obtenida después de aplicar el filtro L_f a S_t , página 78
- SD Distancia simétrica, página 28
- T Transformada simétrica discreta, página 28
- T_c Tiempo de cálculo computacional requerido para realizar una comparación entre dos IMDP con una métrica dada., página 62
- T_e Error topográfico, página 58
- u, v Sistema de coordenadas en las imágenes digitales, página 14
- $unclass_k$ total de IMDP clasificadas incorrectamente en la unidad k , página 59
- W subimagen limitada por el cuadrado digital $2W + 1$ y centrada en la posición (i, j) de A , página 27
- x, y, z Sistema de coordenadas reales de la playa, página 14
- Y_c Intensidad de corte entre las zonas de playa y rotura, página 57
- y_j prototipos temporales obtenidos durante los entrenamientos, página 22
- y_k Unidad del mapa en la posición k , página 22
- $y_{\omega(i)}$ Prototipo ganador o más cercano a un conjunto de datos x_i , página 22
- $y_{i,j}$ Unidades o neuronas de un SOM, página 20
- Y_{P_r} Valor de intensidad de la zona de rotura, página 57
- Y_{P_t} Valor de intensidad de la zona de playa, página 57

- Y_{zr} Valores de intensidad que representan la zona de rotura del oleaje en una IMDP, página 55
- Y_{zt} Valores de intensidad que representan la zona de tierra o playa en una IMDP, página 55
- YIQ Formato de colores primarios adoptado por la National Television System Committee para transmisión de TV. Y corresponde a los valores de Luminancia, página 49
- $h(r)$ Función de vecindad que mide las distancias de los grupos en el mapa, página 22
- $s(t)$ Radio de vecindad, página 22

Introducción

1.1. Exposición de motivos

En las playas se suceden diferentes procesos morfológicos debidos a procesos con una amplia gama de escalas espaciales y temporales, *i.e.* metros y días (erosión por temporales, formación de *cusps*, etc) a años y kilómetros (evolución de la línea de costa, evolución y formación de barras, etc). El estudio de esta gama de fenómenos de amplia variabilidad espacio-temporal, requiere de intensas y prolongadas campañas de recolección de datos. *Aarninkhof* (2003) señaló que una técnica adecuada para estudiar la zona costera debe de cumplir con dos requisitos: proporcionar datos de alta resolución espacial y temporal, y además tiene que ser económica de tal forma que sea posible obtener datos durante largos periodos. Para algunas variables, de características dinámicas principalmente, se cuenta con métodos probados y accesibles que cumplen con estas características *e.g.* oleaje, marea, corrientes, etc. Sin embargo en el caso de las variables morfológicas se requiere de largas e intensas campañas de mediciones, que a su vez son costosas. Esto ha limitado el avance en el estudio de la morfodinámica de playas, puesto que aunque existen modelos de evolución, no existen series largas de observaciones a pasos de tiempo cortos con las que validar o contrastar los resultados.

Los sensores remotos cumplen con estas condiciones, por esta razón en los últimos años su uso se ha incrementado en el estudio de diversos fenómenos que ocurren en las zonas costeras. Existen aplicaciones con radares, imágenes aéreas, imágenes de satélite, vídeos (*Aarninkhof*, 2003), sin embargo hasta hace poco tiempo las más utilizadas habían sido las fotografías aéreas (*Lillesand y Kiefer*, 1987). A principios de los ochenta *Holman* (1981) y *Holman y Bowen* (1984) utilizaron por primera vez imágenes digitales para estudiar ondas infragravatorias en una playa bajo condiciones en las que el uso de otros métodos tradicionales era inadecuado. Posteriormente el descubrimiento de las propiedades de imágenes digitales promediadas llevo al desarrollo de sistemas automáticos de captura y una proliferación de estos sistemas por muy diversas playas para realizar diferentes estudios *e.g.*, monitoreo de la evolución de la línea de costa (*Kroon et al.*, 2007), monitoreo del uso recreativo de una playa (*Jiménez et al.*, 2007), monitoreo de canales de navegación (*Medina et al.*, 2007), predicción de la evolución de la línea de costa (*Smit et al.*, 2007). Las imágenes digitales de playa (IMDP) capturadas por estos sistemas poseen características que permiten detectar a simple vista información y condiciones morfológicas de las playas (ver figura 1.1) Sin embargo su uso implica problemas nuevos, en este caso de visión artificial, puesto que aun cuando para un observador resulta sencillo identificar y, por tanto, medir alguna característica en una imagen, hacerlo de forma auto matizada no es trivial. Por tanto en cada trabajo se han desarrollado técnicas y metodologías de análisis y medición para obtener la información necesaria de las IMDP. En la mayoría de los casos, las técnicas funcionan sobre imágenes que cumplen con ciertas características, pero no son aplicables a toda una colección de forma automática, debido a la gran variabilidad de fenómenos adicionales que presentan *e.g.* los efectos horarios, la luz diaria, clima, efectos de la cámara, etc. Por tanto, los resultados de las técnicas, por si mismos, no son del todo fiables y requieren de supervisión de un usuario experto. Lo cual limita el número de imágenes que pueden ser analizadas.

Ante este panorama, en esta tesis, se plantea aplicar Mapas Auto-Organizativos (SOMs por sus siglas en ingles) para clasificar las IMDP en función de las característi-



Figura 1.1. Ejemplo de una imagen digital de una playa donde es identificable la posición de la línea de costa, la posición y forma de las barras, así como canales de corrientes de retorno.

cas morfológicas en grupos y de esta forma reducir el número de imágenes que requieren supervisión. Los SOMs son redes neuronales competitivas no supervisadas (*Kohonen, 2000*) y están específicamente indicadas para trabajar con espacios vectoriales de altas dimensiones y detectar automáticamente grupos de características homogéneas sin tener que indicar un patrón de salida determinado. Es decir, permiten reducir un conjunto de datos a unos cuantos prototipos representativos de todo el conjunto. En el caso de las IMDP cada prototipo representa un conjunto de imágenes de morfología similar. Reducir una colección de IMDP a unos cuantos prototipos permite reducir el número de cálculos a realizar y por tanto obtener información de toda la colección y no solamente de unas cuantas IMDP.

1.2. Objetivos Generales

Los objetivos generales de la tesis consisten en desarrollar una metodología de aplicación de Mapas Auto Organizativos para el estudio de la morfología de playas a partir de imágenes digitales y posteriormente aplicar la metodología desarrollada en casos de estudios.

Para cumplir con estos objetivos se plantean los siguientes objetivos particulares

- Profundizar en el estudio de los Mapas Auto-Organizativos y evaluar la viabilidad de su uso en la clasificación de imágenes digitales de playas en función del contenido morfológico de las mismas
- Analizar y determinar las condiciones óptimas de los SOMs para clasificar las IMDP
- Implementar un procedimiento y definir una metodología de aplicación a cualquier colección de IMDP
- Aplicar la metodología en el estudio de la evolución morfodinámica de la playa del Puntal en Santander
- Aplicar la metodología en el estudio de la evolución de la línea de costa de la playa Barceloneta en Barcelona

1.3. Estructura del trabajo

El trabajo realizado se presenta organizado de la siguiente manera

- Capítulo 2: Se realiza una descripción de la evolución de los sistemas de adquisición de imágenes digitales en zonas costeras y de las características de las imágenes digitales que se obtienen de las mismas. Se detallan las características de las estaciones de Santander y Barcelona, de donde se obtienen las imágenes usadas en este trabajo. Las imágenes obtenidas en Santander son utilizadas en la implementación de los SOMs, el desarrollo de la metodología y posteriormente usadas para analizar la evolución morfodinámica de la playa. Mientras que las obtenidas de la estación de barcelona son utilizadas para estudiar la evolución de la línea de costa de una de las playas.
- Capítulo 3: Se explica la teoría y los principios de los Mapas Auto-organizativos, y se detallan los avances obtenidos por otros autores en la clasificación de imágenes

digitales. Se realiza una serie de experimentos sencillos, aplicando el *toolbox* de MATLAB[®] desarrollado en la Helsinki University of Technology en 2002, que son de gran ayuda para posteriores descripciones de los resultados del trabajo.

- Capítulo 4: Se plantean y realizan experimentos para obtener la clasificación óptima de las imágenes. En la primera parte del capítulo se realizan clasificaciones usando parámetros propuestos en la bibliografía, posteriormente, se proponen nuevos parámetros y el uso de métricas apropiadas en la comparación de imágenes digitales. Finalmente se realizan clasificaciones y se verifican manualmente con el objetivo de determinar las características de las IMDP que permiten obtener la clasificación óptima.
- Capítulo 5: una vez realizados una serie de experimentos y determinado las condiciones óptimas de IMDP y SOMs se plantea una metodología generalizada.
- Capítulo 6: Se aplica la metodología desarrollada al estudio de la evolución morfodinámica de una playa mesomareal. La playa del Puntal, en Santander, de la que se cuenta con una colección de IMDP de 4 años. Los resultados obtenidos por medio de la metodología basada en SOMs son comparados con los obtenidos por medios tradicionales como la clasificación visual de las IMDP.
- Capítulo 7: Se aplica la metodología desarrollada al estudio de la evolución de la línea de costa en una playa micromareal. La playa de la Barceloneta, en Barcelona, de la que se cuenta con una colección de IMDP de 4 años.
- Capítulo 8: Finalmente se detallan las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo y se describen las líneas de trabajo a desarrollar en el futuro.

