

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

Análisis de la evolución de la línea de costa de la Playa de Barceloneta en Barcelona

7.1. Introducción

Desde que se obtienen IMDP como fuente de información de playas, la detección de la línea de costa ha sido un tema recurrente al que se han propuesto diferentes soluciones. *Osorio* (2005) hace un extenso análisis de los métodos vigentes y propone algunos más. Estos métodos van desde los clásicos modelos de detección de bordes en cualquier tipo de imagen digital *e.g.* operaciones de gradientes, binarización; a los diseñados específicamente para IMDP tipo ARGUS como el SDM (Shoreline Detection Model) de *Aarninkhof* (2003) basado en la técnica PIC (Pixel Intensity Clustering) y PSDM (Physical and Statistical Detection Model) de *Osorio* (2005) que integra 6 algoritmos de reconocimiento de contornos por medio de criterios físicos y estadísticos. Todos estos métodos tienen inconvenientes, algunos funcionan muy bien bajo algunas condiciones de IMDP pero fallan en otras, se ven afectados por las condiciones climáticas (viento, lluvia, hora del día) e hidrodinámicas (marea, oleaje y viento), y sobretodo requieren de la operación y supervisión de un usuario experimentado.

Por tanto ante colecciones de IMDP cada vez mayores, el trabajo de la detección de la línea de costa se vuelve limitado y subjetivo. *Ojeda* (2008) realizó detecciones de línea de costa de algunas playas de Barcelona para un periodo de 3 años a IMDP usando el método de SDM, con un intervalo de entre 1 y 15 días dependiendo de los cambios en las imágenes. Las principales dificultades que encontró fueron la falta de contraste entre el agua y la arena sobretodo en verano, por lo que tuvo que recurrir a la detección manual.

Ante situaciones como esta surge la alternativa de aplicar una metodología como la aquí diseñada. Entrenar la colección de IMDP en un SOM permite crear grupos según las características de las IMDP y obtener prototipos representativos. De esta forma, la detección de la línea de costa solo se realiza en los prototipos y por extensión se asigna al resto de IMDP. De esta forma, si bien no se soluciona el problema de la supervisión y experiencia del usuario, si se reduce a unos pocos casos el problema de la detección de la línea de costa. Es importante señalar que obtener series de evolución de una playa por periodos largos y con una alta frecuencia de muestreo, tiene múltiples aplicaciones como la determinación de la batimetría intermareal, estudiar procesos de erosión-depositación y la validación de modelos tipo *One Line*.

En este capítulo se propone aplicar la metodología diseñada a la Playa de la Barceloneta en Barcelona. Esta es una playa encajada de aproximadamente 1.1 *km* de longitud. Tanto esta playa, como las vecinas, fueron recuperadas para los juegos Olímpicos de Barcelona 2002 por medio de la construcción de una serie de diques perpendiculares. Esta playa no se mantiene en equilibrio por lo que frecuentemente es necesario verter arena para recuperarla. La presencia de estas actuaciones así como las variaciones naturales estacionales resultan en una buena motivación para aplicar la clasificación de IMDP a través de SOM usando la metodología aquí propuesta.

7.1.1. Objetivo

1. Explorar las capacidades de la metodología desarrollada para detectar variabilidad de largo y medio plazo en la posición de la línea de costa, debidas a causas naturales o artificiales.
2. Estudiar la evolución y cambios en la línea de costa de la playa la Barceloneta

7.2. Descripción del área

La playa de la Barceloneta, forma parte del conjunto de playas de la ciudad de Barcelona. Esta limitada al sur por el puerto de Barcelona y al norte por la playa de Somorostro, tiene una orientación aproximada de 20° (ver figura 7.1). Los principales procesos morfológicos que ocurren en la playa son la erosión-acreción y la rotación; la playa también es afectada continuamente por la actividad humana, entre lo que destaca la limpieza de la arena previo a la estación de verano y redistribuciones de arena después de las tormentas. También se han realizado regeneraciones importantes: en julio del 2002 se vertieron $40,000 m^3$; en junio del 2004 se transfirieron $30,000 m^3$ de arena de la zona sur a la norte; en marzo del 2006 se vertieron $80,000 m^3$ y posteriormente en julio del 2006 se añadieron $46,000 m^3$ (Ojeda, 2008). Finalmente a partir de noviembre del 2006 se inicio la construcción de un dique exento lo que da como resultado su configuración actual.

7.2.1. Características dinámicas

La costa catalana es micro-mareal ($\sim 20 cm$), aunque presenta una fuerte componente estacional. La figura 7.2 muestra la serie de nivel del mar para el periodo 2004-2006.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA PLAYA DE BARCELONETA EN BARCELONA

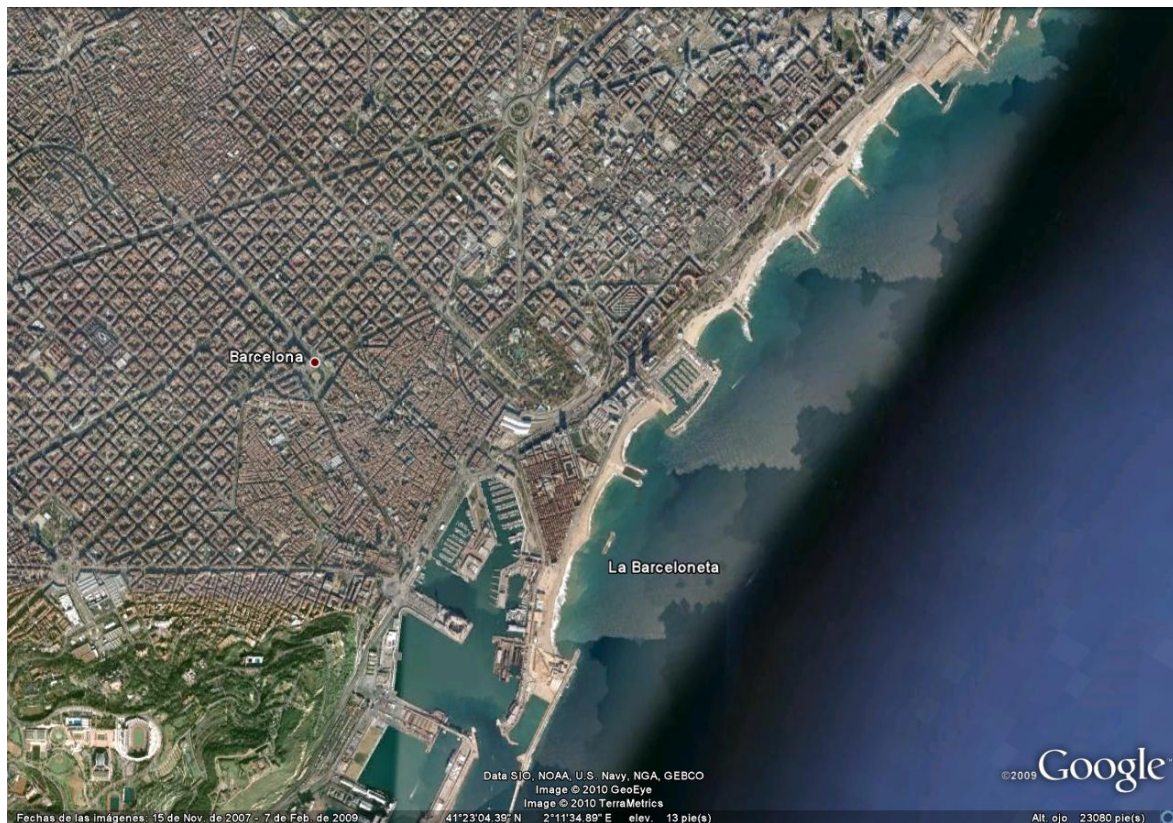


Figura 7.1. Ubicación de la playa de la Barceloneta, en Barcelona, España. Tomada de Google Earth

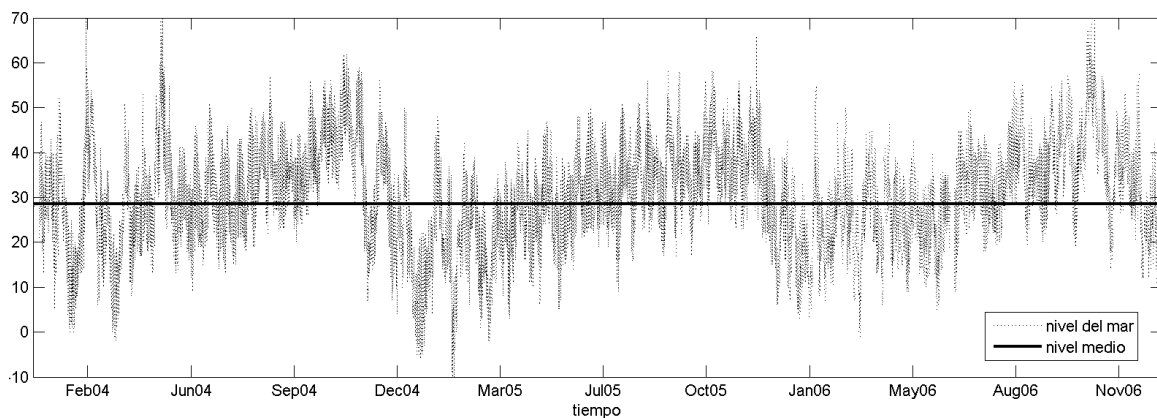


Figura 7.2. Nivel del mar (cm) en la zona de la playa de la Barceloneta.

7.3. Colección de imágenes

En el presente estudio se utilizaron las IMDP, comprendidas entre el 1 de enero del 2004 al 31 de diciembre 2006, proporcionadas por el *Coastal Ocean Observatory* del ICM (CSIC) de Barcelona. Durante este periodo se almacenaron alrededor de 15,330 IMDP a razón de una por hora durante las horas diurnas. Este periodo es suficiente para evaluar la capacidad de la técnica para detectar variaciones estacionales, y las diferentes actuaciones de rellenos y recolocación de arena realizados en este periodo.

7.4. Metodología

El estudio de la evolución de la línea de costa en la playa de la Barceloneta se realiza tomando como base las IMDP obtenidas de la estación ARGUS para el periodo 2004-2006. Se analizó este periodo debido a que es suficiente para observar cambios de largo y medio plazo y la alta frecuencia de las IMDP permiten detectar cambios de corto plazo como los rellenos artificiales antes señalados.

La colección de IMDP fue clasificada usando SOMs siguiendo la metodología desarrollada y explicada en el capítulo 5 con unas pocas adaptaciones. Primero, debido a la longitud de la playa de la Barceloneta la reducción de la resolución de las IMDP se realizó solamente en la dirección de la línea de costa, de tal forma que en la dirección del perfil de playa no se pierde resolución lo que permite detectar con mayor detalle las líneas de costa. Posteriormente, para ver los cambios suaves y lentos de la línea de costa, las unidades del mapa no fueron agrupadas en supergrupos. Finalmente, la evaluación de la calidad del mapa, realizando comparaciones entre diferentes mapas, se sustituyó por una evaluación de la calidad de la determinación de la línea de costa, para lo cual una vez reconstruida la serie de evolución se detectó nuevamente la línea de costa del 10% de las IMDP seleccionadas aleatoriamente y se compararon los resultados con los obtenidos por medio de SOMs.

7.5. Entrenamientos

7.5.1. Procesamiento de IMDP

La primera etapa de la metodología consiste en homogeneizar la colección de IMDP rectificadas de tal forma que se descarte al máximo posible características que no interesan a la clasificación. Como se observan en la figura 7.3 las IMDP de la Barceloneta rectificadas muestran además de la playa los diques que la separan por el extremo norte de la playa de Somorrostro y al sur del puerto de Barcelona, así como la zona de la ciudad más cercanas a la playa. Estas estructuras afectan a la clasificación y la condicionan, por lo que es necesario descartarlos.

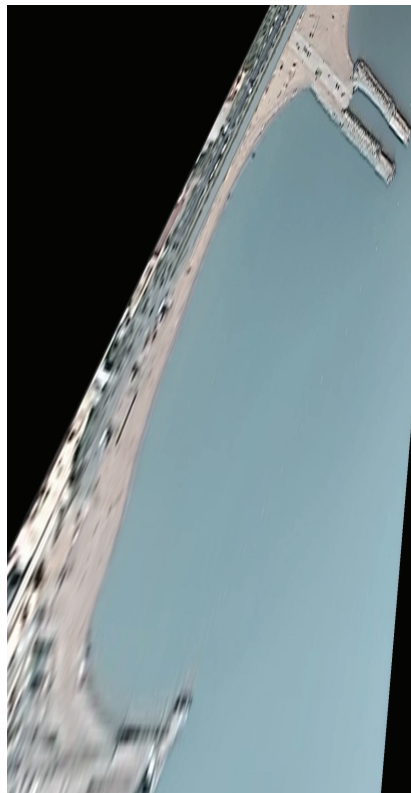


Figura 7.3. Ejemplo de IMDP de la Barceloneta.

Por tanto el área de análisis de las IMDP rectificadas se redujo a la zona más

próxima a la línea de costa, tanto por el lado de tierra como del mar, puesto que el interés del análisis se concentra en las variaciones de la misma. Así que se redujeron las dimensiones de las IMDP y se giraron 290° para obtener una vista de la playa paralela a los ejes de las imágenes. El resultado de este proceso se muestra en la figura 7.4.

En el caso de la playa de Barceloneta la variación del nivel del mar es del orden de 0.40 mts (ver figura 7.2), y aunque estas variaciones son pequeñas podrían influir en la configuración de las IMDP, por lo tanto se redujo la colección a una IMDP por día obtenida mientras el nivel del mar se encontraba entre $0.35 \pm 0.015 \text{ mts}$. Así además se reduce la colección, lo que facilita los entrenamientos, a 851 IMDP. Posteriormente, las IMDP restantes se transformaron de imágenes RGB a tonos de grises y ecualizadas para eliminar los efectos de variaciones de luz y meteorológicos.

Debido a la longitud de la playa de la Barceloneta, se redujeron las dimensiones de las IMDP seleccionando solamente una banda de píxeles, de la dirección perpendicular a la línea de costa, aproximadamente cada 50 mts . La figura 7.5 muestra las bandas seleccionadas de una IMDP y la imagen resultado de tomar las bandas señaladas.



Figura 7.4. Ajuste y giro de 290° en una IMDP de la zona de la Barceloneta.

De tal forma que la imagen representativa de la playa contiene solo los valores de píxeles en las bandas señaladas sin perder resolución en la dirección perpendicular a la línea de costa. La figura 7.6 muestra una IMDP una vez descartadas las bandas no seleccionadas. Finalmente, se analizó la distribución de la intensidad de los píxeles de la colección de IMDP, para definir valores típicos de intensidad para la playa seca, el mar y una intensidad de corte Y_c que las separe. En la figura 7.6 se indican los puntos seleccionados como referencia de cada categoría y en la figura 7.7 se muestra la

distribución de valores de cada categoría en los puntos señalados, la intensidad de corte ($Y_c = 0.65$) y las distribuciones resultado después de aplicar el corte a la colección.

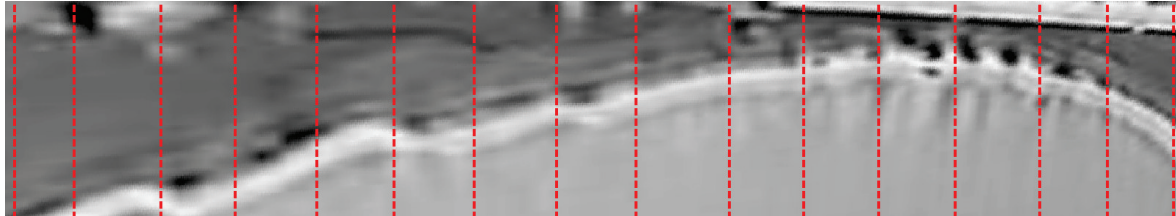


Figura 7.5. Se indican las bandas de píxeles seleccionadas de cada IMDP a usar como parámetros de entrada en los entrenamientos de los SOMs.

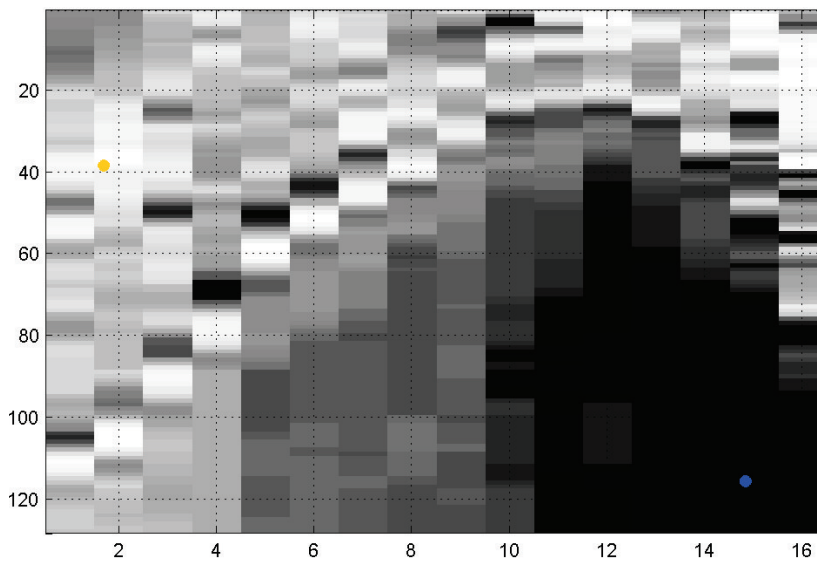


Figura 7.6. Se muestran solamente las bandas seleccionadas para los entrenamientos. También se indican los píxeles elegidos como característicos de las zonas de playa seca y mar.

Por tanto, posterior al procesamiento de las IMDP la colección quedó reducida a 145 imágenes de 181×17 píxeles lo que implica 3077 parámetros de entrada al entrenamiento.

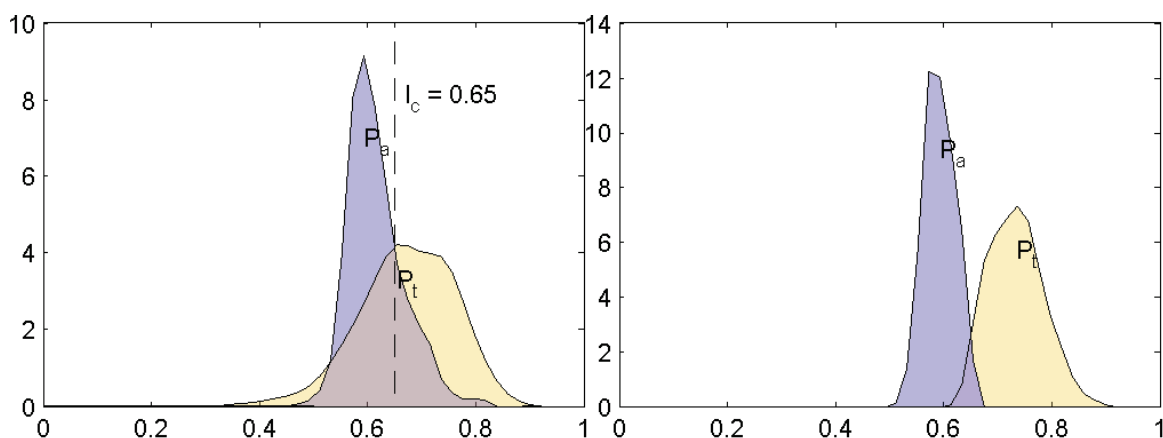


Figura 7.7. Al lado derecho se muestran la distribución de los valores de intensidad de los píxeles de playa seca P_t y mar P_a , así como la intensidad de corte Y_c entre ambas distribuciones. Al lado izquierdo se muestran las distribuciones obtenidas al aplicar el corte a las distribuciones originales.

7.5.2. Entrenamiento de mapas

Los entrenamientos se realizaron en mapas de distintas dimensiones para encontrar la clasificación óptima. El número máximo de unidades en el mapa está dado por la relación 5.2, considerando que la colección contiene $n = 145$ IMDP (después del procesamiento), de $r = 3077$ píxeles o dimensiones y la memoria máxima a utilizar es de $1GB$, tenemos que el mapa máximo cuenta con más de $m_{max} = 4300$ unidades. Ya que $m_{max} \gg n$ implica que el tamaño del mapa no está determinado por el procesador, por lo tanto los tamaños recomendados están entre $10\% \leq 50\%$ que equivale a mapas con más de 15 unidades y menos de 70. Ya que se desconoce la variabilidad de la línea de costa, se plantea realizar diferentes entrenamientos aumentando el tamaño del mapa en busca del menor mapa con la mayor variabilidad representada. Por tanto se plantea realizar entrenamientos en mapas que contienen tantos prototipos como el 15%, 20%, 25%, 30%, 40% y 50% del total de IMDP seleccionadas durante el preprocesamiento, es decir 5×4 , 6×5 , 6×6 , 6×7 , 8×7 y 9×8 unidades respectivamente. Los prototipos de cada mapa entrenado se determinaron según indica la metodología.

Las figuras 7.8 y 7.9 muestran los mapas de prototipos encontrados de 5×4 y 9×8

unidades respectivamente. En el mapa de 5×4 unidades (Figura 7.8) se distinguen 3 categorías principales; la primera, en las unidades $5B$, $5C$, $5D$, $4C$, $4D$, $3D$ y $2D$ agrupa las IMDP que presentan una línea de costa con irregularidades. El resto del mapa contiene IMDP donde la principal característica son las líneas de costa cóncavas, sin embargo en las unidades $1A$, $1B$, $2A$ y $3A$ se nota que la playa se encuentra en una posición más adelantada que en el resto. También se observan algunos prototipos intermedios entre las 3 categorías *e.g.* $5B$ y $3C$.

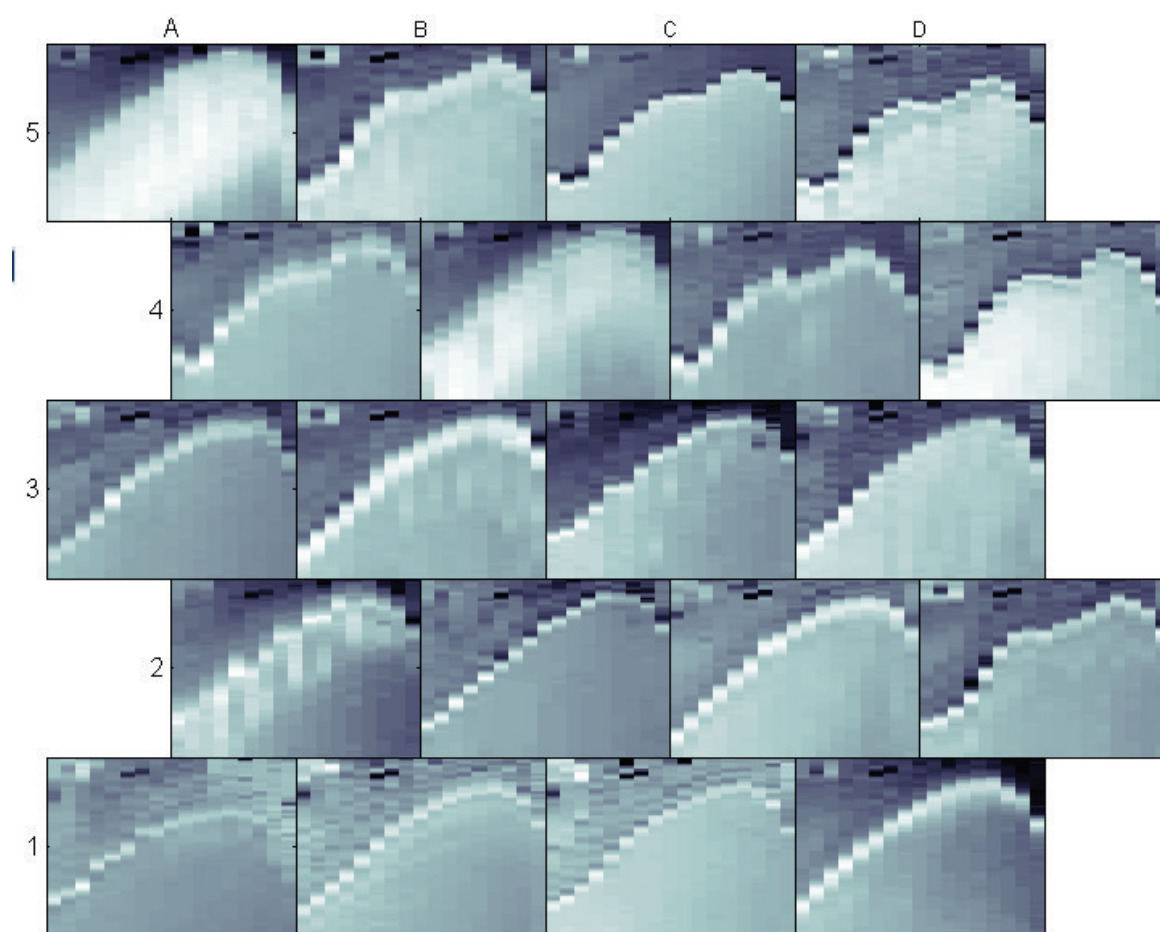


Figura 7.8. Mapa de prototipos obtenido del entrenamiento de un SOM de 5×4 unidades.

Al aumentar las dimensiones del mapa se generan nuevos prototipos que describen con mayor detalle a las IMDP que representan, los prototipos son organizados de formas distintas y forman nuevos grupos por lo que cada mapa requiere de ser analizado. A continuación se muestra el mapa de 9×8 unidades (Figura 7.9), los mapas inter-

medios no se muestran por cuestión de espacio. En este nuevo mapa se observa mayor variabilidad en los prototipos que describen morfologías distintas. La distribución de los prototipos en el mapa mantiene similitudes con todos los mapas de menores dimensiones, lo que se puede comprobar al comparar los dos mapas mostrados. Al lado izquierdo del mapa (en columnas *A*, *B* y *C*) se observan prototipos de playa cóncava, sin ningún tipo de estructura o forma adicional. En las unidades 1*A* y 2*A* se observan las playas más simétricas, mientras que el resto de las playas en estas columnas presentan un basculamiento hacia el sur de la playa. Al lado derecho del mapa (columnas *F*, *G*, *H*) se observan prototipos en los que la línea de costa presenta variaciones rítmicas. Hacia el centro del mapa se agrupan la mayoría de las unidades vacías y algunos prototipos intermedios.

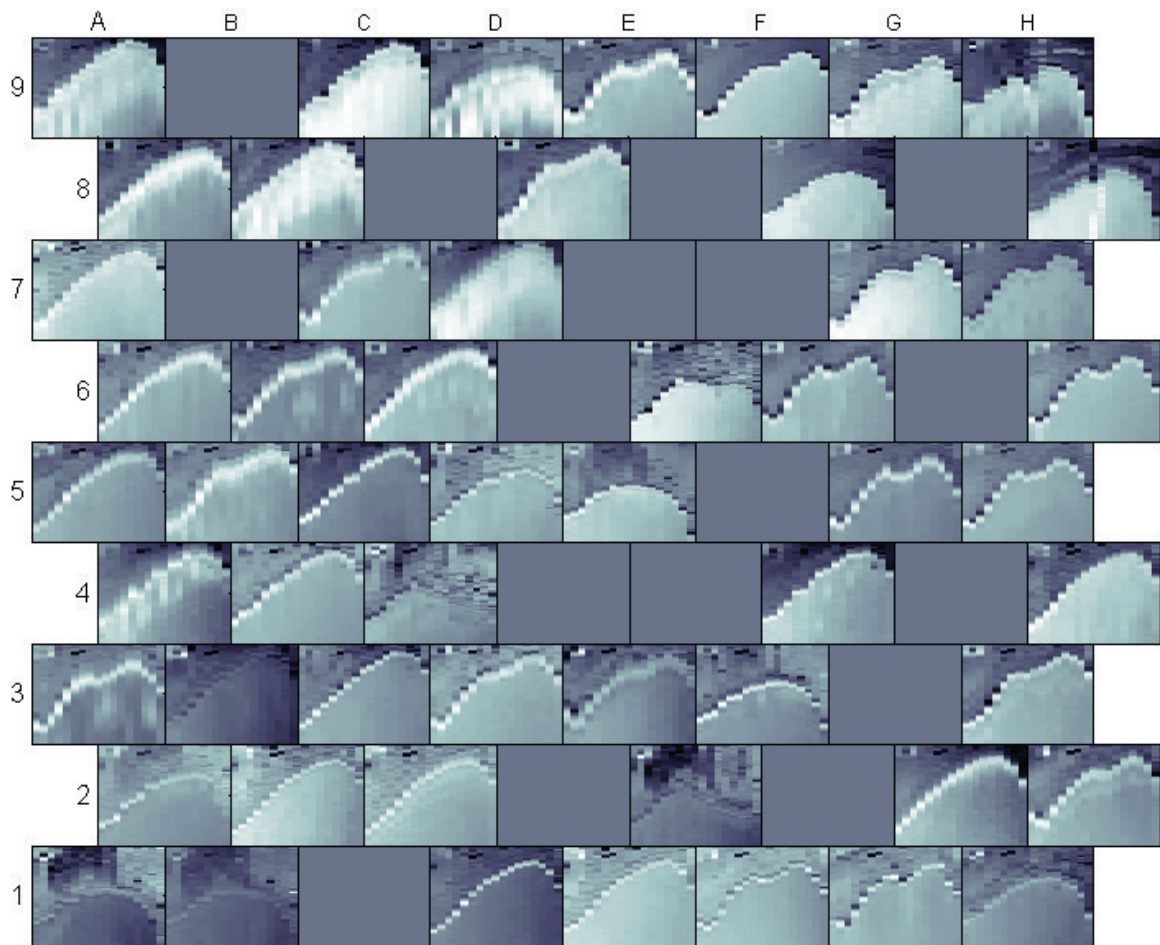


Figura 7.9. Mapa de prototipos obtenido del entrenamiento de un SOM de 9×8 unidades..

En la revisión del mapa de 9×8 unidades se encontró que los prototipos son variados y que abundan las unidades vacías en el mapa. El mapa de 8×7 presenta una distribución de unidades muy similar y apenas presenta unidades vacías, por lo tanto se puede considerar que al utilizar mapas mayores de 8×7 no proporciona información adicional a la clasificación de las IMDP de la Barceloneta.

7.5.3. Determinación de series de evolución

En esta etapa del análisis la metodología sugiere la formación de supergrupos, sin embargo al considerar cada unidad del mapa como un supergrupo y detectar una línea de costa para cada prototipo es posible conservar las pequeñas variaciones entre prototipos vecinos o muy cercanos. Además, considerando adecuado el mapa de 8×7 unidades, detectar 56 líneas de costa no resulta de un trabajo excesivo tomando en cuenta el número original de IMDP. Existen diversas técnicas para detectar la línea de costa a partir de una IMDP, que van desde los clásicos métodos de detección de bordes, operadores con gradientes o binarización a los más complejos y específicos, diseñados especialmente para trabajar con IMDP tipo ARGUS *e.g.*, *Shore Detection Model* (Aarninkhof, 2003), *RatiosRGB*, *PatrónWL* y el *PSDM* que integra 6 métodos en uno (Osorio, 2005). En este punto cualquiera de estas técnicas puede ser utilizada, sin embargo ya que la detección se redujo a solo unas pocas IMDP es posible realizarla por medio de una simple digitalización. La importancia utilizar SOMs a la colección radica en que las técnicas de detección de líneas de costa requieren supervisión, lo que limita el número de IMDP que pueden ser analizadas. La reducción de la colección a unos cuantos prototipos permite supervisar y cerciorarse que la detección de la línea de costa ha sido adecuada y extender este resultado a todas las IMDP agrupadas en el SOM.

La figura 7.10 muestra las líneas de costa de los prototipos del mapa de 8×7 unidades. Estas líneas de costa prototipos son asignadas a las IMDP agrupadas en cada prototipo, de tal forma que con la información temporal de cada IMDP se reconstruye

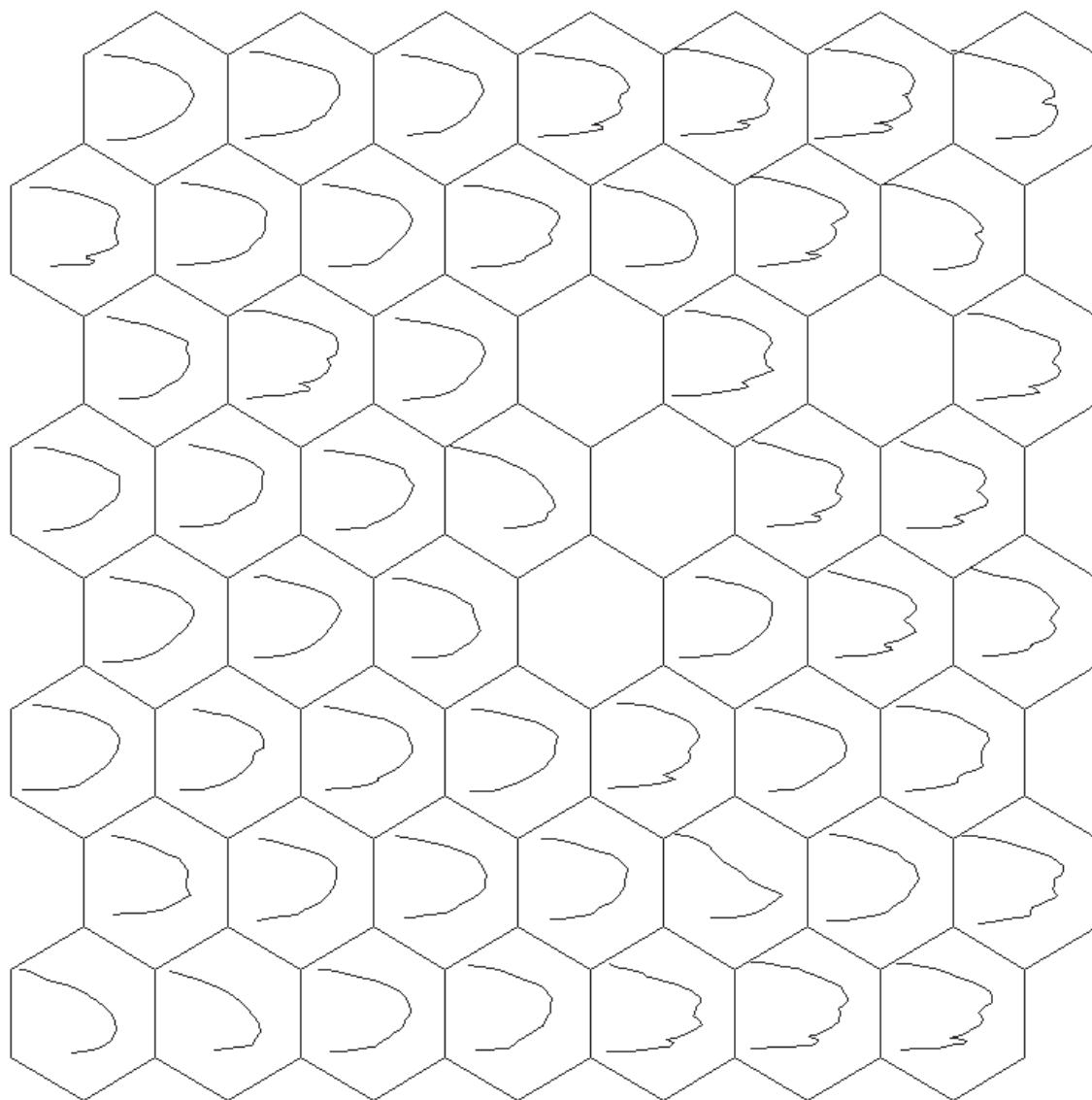


Figura 7.10. Líneas de costa medidas de los prototipos del mapa entrenado de 8×7 .

la serie temporal de evolución.

La metodología indica, que para determinar el mapa que proporcione la clasificación óptima, se requiere comparar las series obtenidas a partir de los supergrupos de diferentes mapas, en el caso de la Barceloneta no se formaron supergrupos y la línea de costa se determinó en cada prototipo. Esto permite que la diferencia entre la línea de costa medida en el prototipo y el resto de IMDP contenida en cada unidad sea menor

que si se considera solamente una determinación de línea de costa para un supergrupo. Sin embargo, determinar las líneas de costa de otros mapas para comparar las series obtenidas implica un trabajo excesivo, que además no proporciona información acerca de las diferencias entre la línea de costa del prototipo y las líneas de costa reales de cada IMDP contenida en cada unidad del mapa. Por lo tanto la evaluación de la calidad de las mediciones, se realizó en dos partes: Primero se graficaron las líneas de costa asignadas en el mapa a las IMDP agrupadas en cada unidad del mapa y se determinó la distribución y frecuencia de las IMDP mal clasificadas. Se encontró que en el 7% de los casos las líneas de costa de los prototipos no corresponde a las IMDP. La figura 7.11 muestra un par de ejemplos típicos de esos casos. Ya que el porcentaje de estos fallos en la clasificación es muy bajo, estas IMDP se retiraron de la clasificación.

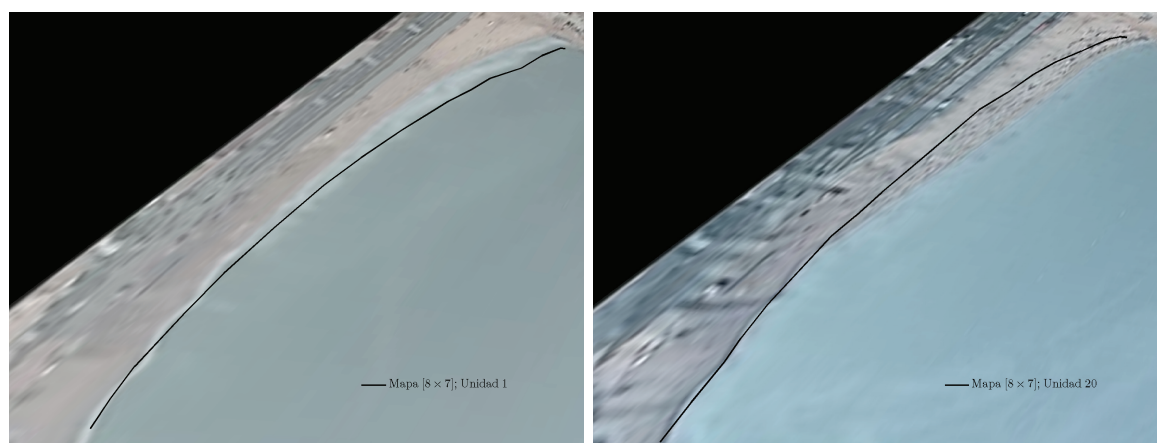


Figura 7.11. Fallos típicos encontrados en la clasificación de IMDP de la Barceloneta en función de la posición de la línea de costa. A la izquierda en la IMDP del 21/06/06 la línea de costa asignada a través del mapa esta adelantada con respecto a la línea de costa real. A la derecha, en la IMDP del 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.

Para obtener un valor medio de la precisión de la medición de la línea de costa, se determino la linea de costa del 10% de las IMDP seleccionadas aleatoriamente y se encontró que la diferencia cuadrática media entre las líneas de costas medidas y las asignadas en el mapa es menor a 5 *mts*. La figura 7.12 muestran algunos ejemplos de las líneas de costa comparadas.

7.5 Entrenamientos

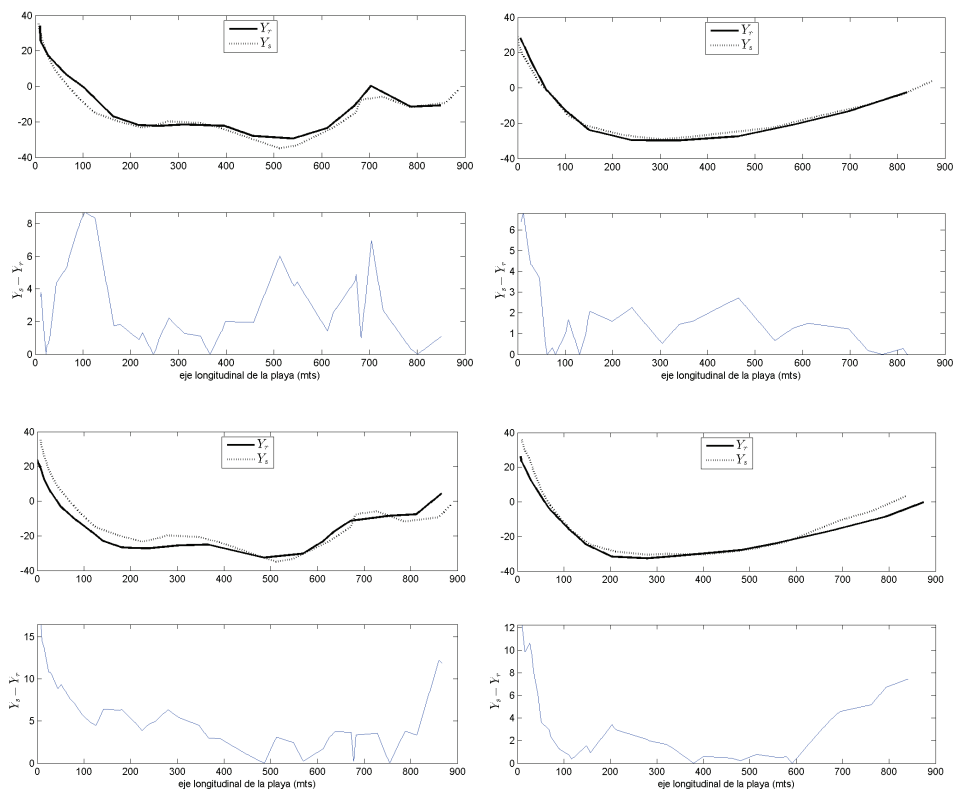


Figura 7.12. Se muestran 4 ejemplos donde se la posición de la coordenada perpendicular de la línea de costa asignada en el SOM, Y_s , y la medida, Y_r . También se indican las diferencias encontradas entre ambas mediciones. En ninguno de los casos se encontraron diferencias menores a los 10 *mts* y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

Finalmente, una vez descartadas las IMDP mal clasificadas y que se determinó el orden de precisión de las líneas de costa, la serie de evolución, obtenida a partir del mapa de 8×7 unidades, se muestra en la figura 7.13. El eje horizontal tiene aproximadamente una orientación Norte-Sur por lo que, el eje vertical representa una línea de costa a una fecha determinada, y los colores indican la posición de la línea de costa en la coordenada perpendicular con respecto a las IMDP, de tal forma que los tonos rojos indican posiciones adelantadas de la línea de costa y los tonos azules posiciones retrasadas. En esta se aprecia una forma cóncava, con el extremo sur mas adelantado que el norte. Los mayores retrocesos se observan en los inviernos en la zona central de la playa y los avances durante los veranos. Destaca el avance de la línea de costa en el 2006, debido a los rellenos realizados. Los rellenos del 2004 no son evidentes.

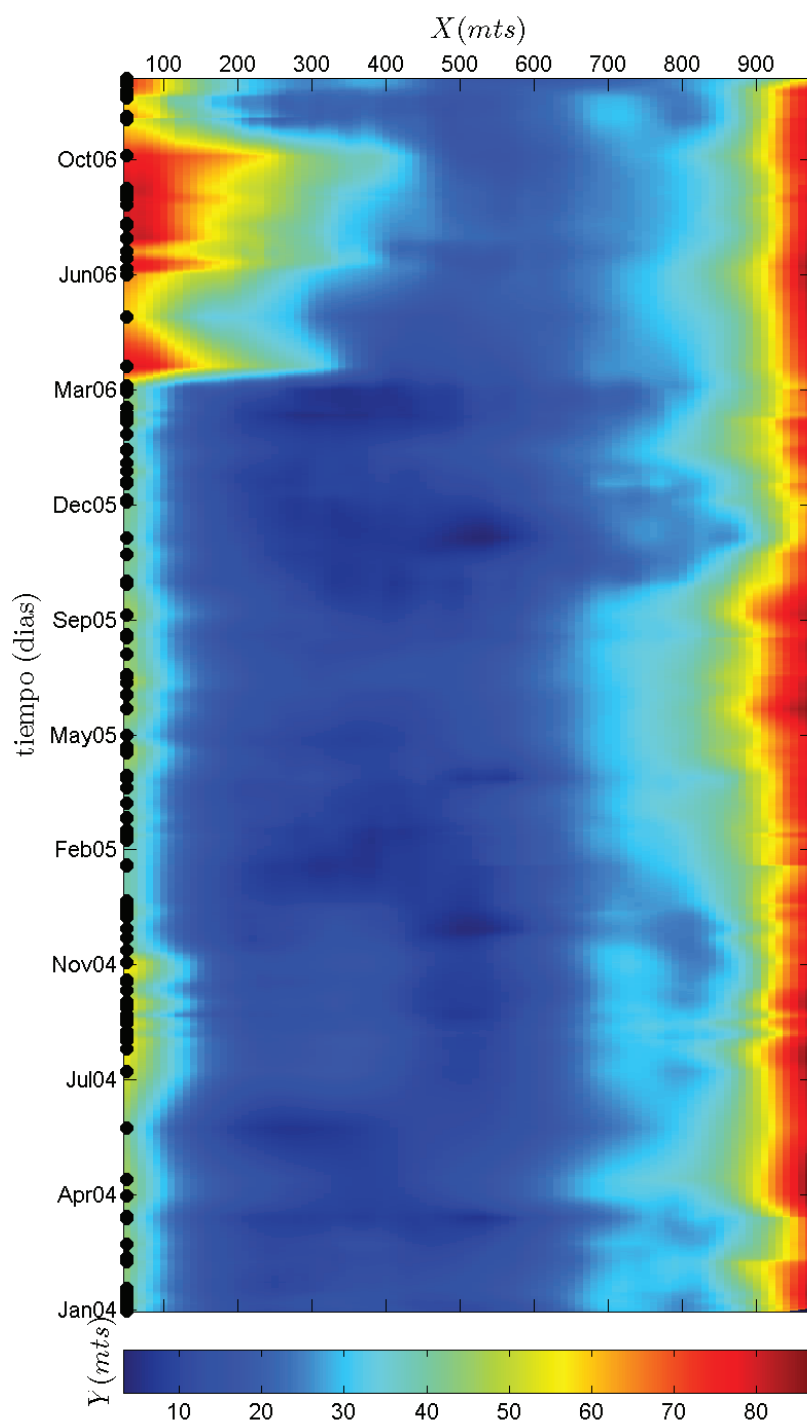


Figura 7.13. Reconstrucción de la evolución de la línea de costa en la playa de la Barceloneta. Los tonos indican la posición de la coordenada perpendicular, Y a la línea de costa en función de la coordenada paralela a la misma, X , a lo largo del periodo analizado. El eje horizontal tiene una orientación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

7.6. Análisis del mapa obtenido y Series de evolución

Aun cuando en el SOM entrenado (Figura 7.10) no se formaron supergrupos es posible caracterizar las zonas del mapa. En cada una de estas zonas los prototipos describen una forma *preferida* o modal de la línea de costa. La figura 7.14 muestra las ocho formas modales encontradas: cuatro describen una playa cóncava sin formas (grupo A, B, C y E) , dos en los que la playa esta dividida en 3 formas cóncavas (grupos F y G), uno mas donde la playa esta dividida en dos formas cóncavas (grupo H) y finalmente donde la playa no tiene forma cóncava sino que asemeja una V (grupo D).

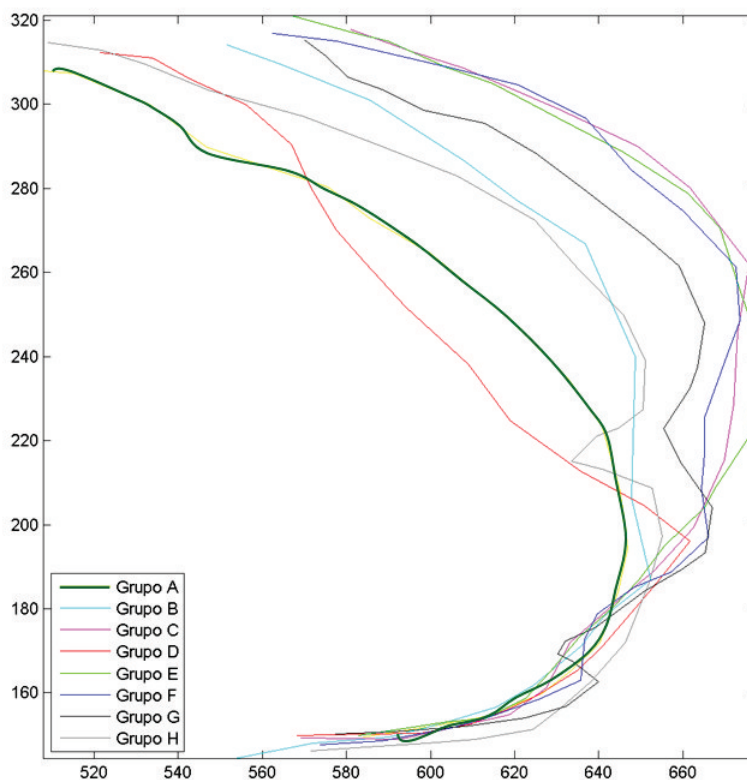


Figura 7.14. Formas típicas encontradas en la playa de la Barceloneta, en el periodo 2004-2006.

El grupo A y D describen situaciones de acreción, la línea de costa del grupo A es cóncavo y suave, representa una situación de acreción natural, mientras que en el grupo D la forma en V de la playa es producto de la regeneración artificial. Los grupos C y E describen playas cóncavas en situaciones de retroceso. El grupo B describe una situación intermedia. Los grupos F y G presentan formas de líneas de costa con formas rítmicas y el grupo H, contiene las IMDP obtenidas al inicio de la construcción del dique exento a finales del 2006.

Para poder observar las zonas y periodos de erosión y acreción se eliminó la línea de costa media de tal forma que sólo se conserva la anomalía de la posición de la línea de costa. En la figura 7.15 se muestra la anomalía y se puede apreciar ligeramente una variación estacional con acreción en verano y erosión en invierno, sin embargo la principal característica de la figura es el avance de la línea de costa, del orden de los 30 *mts*, a partir de marzo del 2006. Durante el periodo descrito se realizaron tres rellenos de la playa, en junio del 2004 y en marzo y julio del 2006. Los rellenos del 2006 corresponden al avance observado en esta figura.

Este avance tan pronunciado, oculta las variaciones en el resto del periodo e impide observar la variabilidad estacional y los otros rellenos. Para observar estas variaciones, previas al relleno del 2006, la figura 7.16 muestra solamente el periodo anterior a este año. En esta figura se observa la variación estacional con avances y retrocesos del orden de los 10 *mts* muy marcado en la zona sur de la playa. También se aprecia una zona de acreción importante en la parte norte debida al relleno de junio del 2004 y en seguida, en el invierno del 2004-2005, de un periodo de basculamiento en la que la parte norte de la playa retrocede aproximadamente 15 *mts*, mismos que avanza en la parte sur. Mas adelante en el verano de 2005 se observa una acreción generalizada aunque más notoria en la zona sur y durante el invierno un retroceso del orden de los 10 *m* en la zona norte y 20 *mts* en la zona sur.

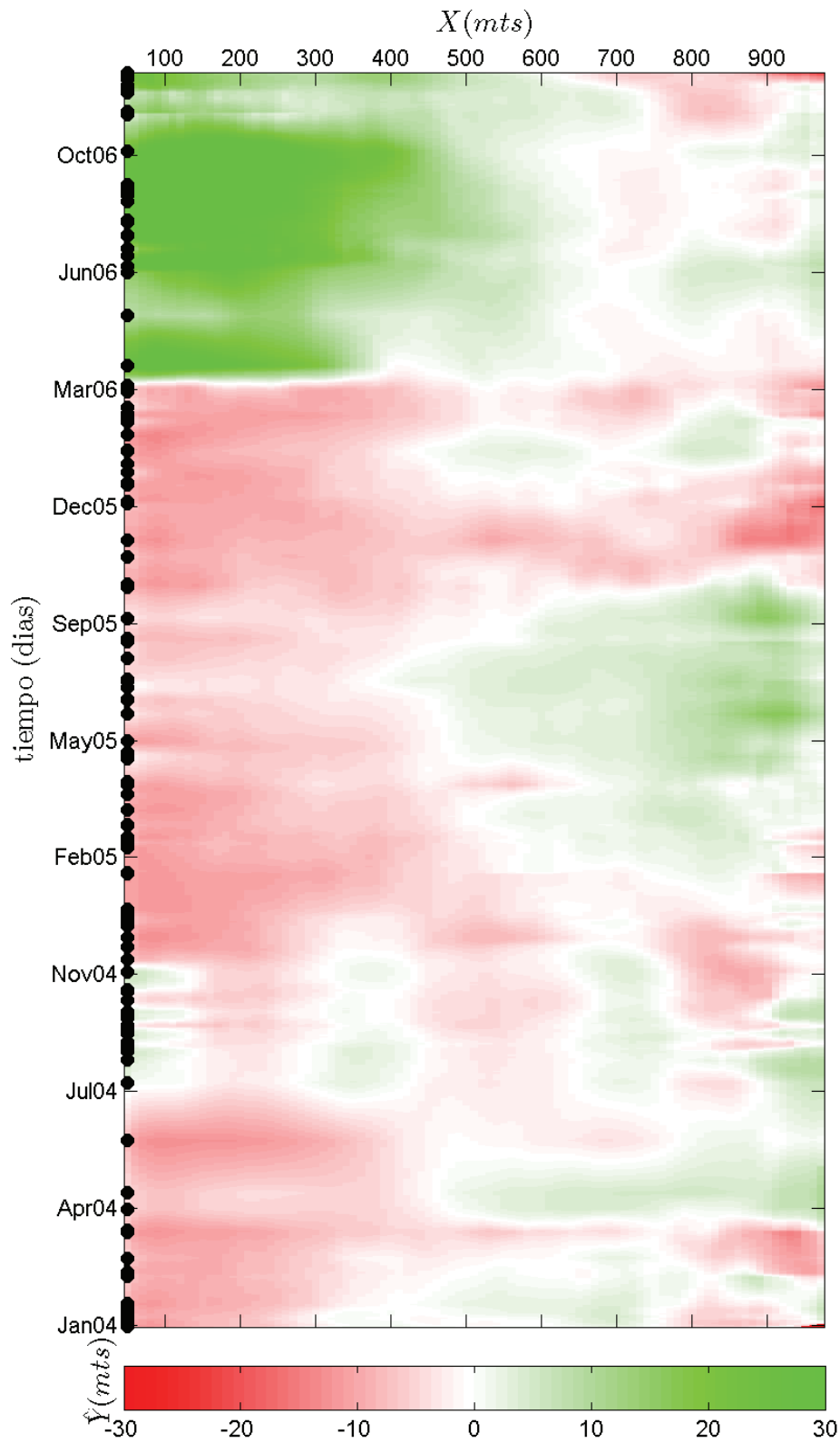


Figura 7.15. Variación neta de la línea de costa, \hat{Y} , en la playa de la Barceloneta, obtenida haciendo $\hat{Y} = Y(X) - \bar{Y}$. Los tonos indican los valores de \hat{Y} en *mts* en función de la coordenada paralela a la misma, X , a lo largo del periodo analizado. Los tonos verdes indican acreción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

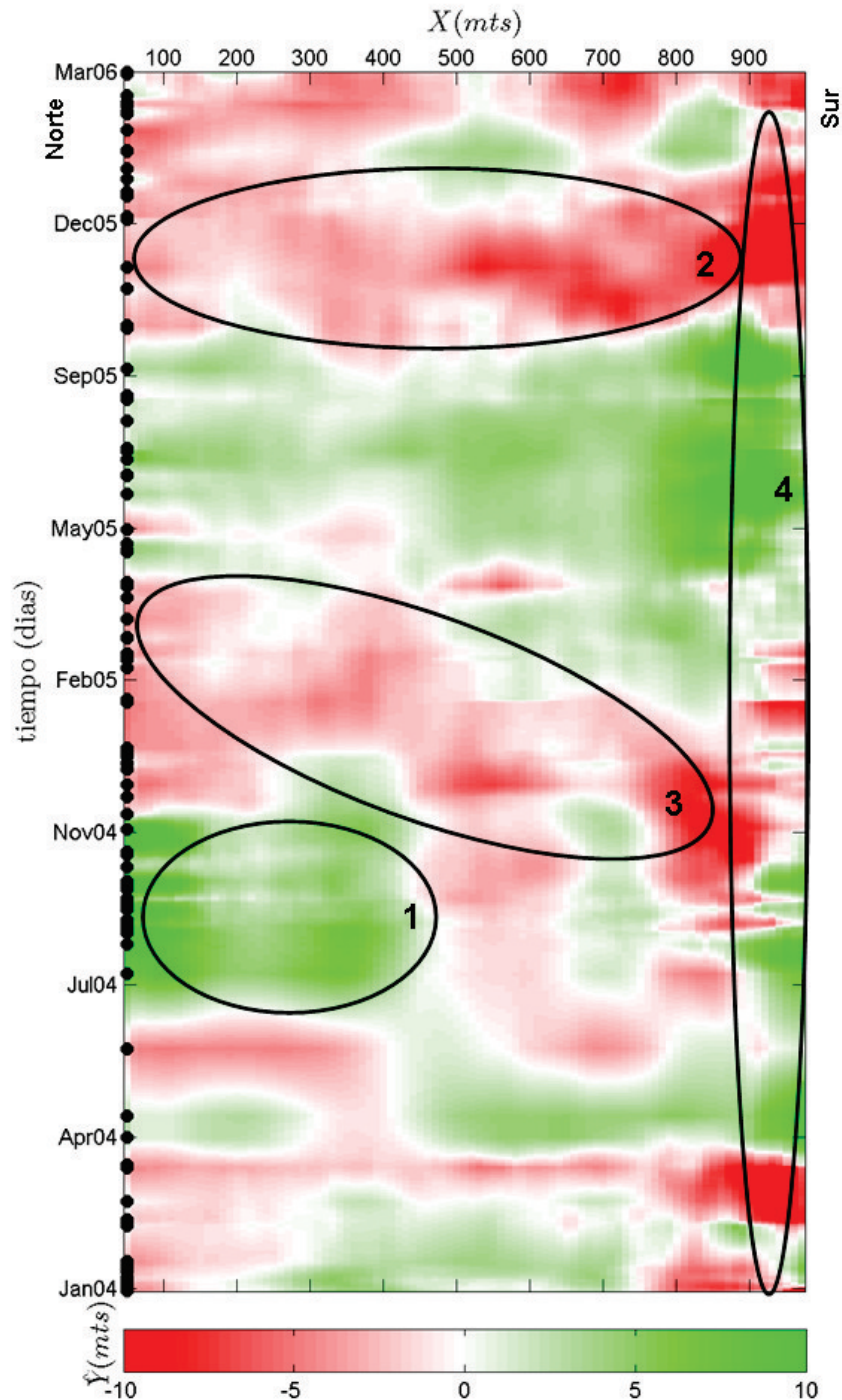


Figura 7.16. Variación neta de la línea de costa, \hat{Y} , en la playa de la Barceloneta, obtenida haciendo $\hat{Y} = Y(X) - \bar{Y}$. Los tonos indican los valores de \hat{Y} en *mts* en función de la coordenada paralela a la misma, X . A diferencia de la figura anterior, la primavera y el verano 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 línea 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.

7.7. Conclusiones

En la actualidad los métodos de detección de la línea de costa a partir de las IMDP requieren de la supervisión de un usuario experimentado, por lo que analizar y detectar la línea de costa de un conjunto grande de IMDP no es factible. En este capítulo se propuso realizar una clasificación de las IMDP en un SOM por medio de la metodología desarrollada previamente, de tal forma que la colección de IMDP sea reducida a solo unos pocos prototipos representativos y posteriormente determinar la línea de costa a estos últimos.

La colección esta conformada por alrededor de 15,330 IMDP, obtenidas con una frecuencia horaria durante las horas del día desde el 1 de enero del 2004 al 31 de diciembre del 2006. Estas fueron tratadas para descartar los efectos meteorológicos y de la marea según se indica en la metodología. El resultado fue la reducción de la colección a 145 IMDP, que equivale a 1 IMDP cada 7 días. A cada IMDP se recorto a la zona de interés y se redujo la resolución de la imagen en la dirección paralela a la línea de costa de tal forma que cada IMDP quedo reducida a 181×17 píxeles que representan un área de aproximadamente 900 *mts* de playa.

Se realizó un entrenamiento inicial usando un mapa con tantos prototipos como aproximadamente el 15 % de las IMDP preprocesadas, sucesivamente se entrenaron mapas de mayores dimensiones (20 %, 25 %, 30 %, 40 % y 50 %). Cada mapa entrenado se evaluó en términos de la variabilidad de prototipos mostrados y el número de unidades vacías en el mapa. Se encontró que el mapa de 9×8 (el 50 %) no representaba mayor variabilidad que el de 8×7 por tanto se considero esta clasificación como adecuada.

Para conservar las pequeñas variaciones de la línea de costa, no se consideraron supergrupos y se determinó una línea de costa por cada unidad del mapa. Las líneas de costa de los prototipos del mapa de 8×7 se determinados digitalizando directamente de las IMDP correspondientes sin rectificar. Esta línea de costa fue asignada a cada

una de las IMDP de las unidades del mapa y se reconstruyó una serie temporal. La serie temporal fue evaluada en dos pasos: primero se comprobó visualmente la línea de costa asignada a cada IMDP, y se descartaron aquellas en las que la asignación fue incorrecta. Estos casos correspondieron a menos del 7% de las IMDP clasificadas. Posteriormente, para evaluar la precisión de las líneas de costa de los prototipos con las IMDP, se seleccionaron aleatoriamente el 10% de las IMDP de las que se obtuvo una nueva línea de costa. Las líneas de costa obtenidas del mapa y la determinada directamente de la IMDP se compararon y se encontró que la diferencia cuadrática media entre ambas es menor a 5 *mts*.

En la reconstrucción de la serie de evolución de la línea de costa se encontró un comportamiento estacional con retrocesos de la línea de costa durante los inviernos y basculamientos de la zona sur en verano. Se encontró que la playa estacionalmente tiene avances y retrocesos del orden de los 10 *mts*. Se detectaron las regeneraciones realizadas en el 2004 y en el 2006, así como los cambios producidos por la construcción del dique exento al final del periodo analizado.