



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DETECCIÓN DE LÍNEAS DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES DIGITALES DE PLAYAS POR MEDIO DE FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES Y SU APLICACIÓN EN LAS PLAYAS DEL PUNTAL Y SARDINERO

Trabajo realizado por:

Arantza de Echenique Santisteban

Dirigido:

Mauricio González Rodríguez

Omar Quetzalcóatl Gutiérrez Gutiérrez

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos**

Santander, octubre de 2016

TRABAJO FINAL DE MASTER

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	7
1.1	MOTIVACIÓN	7
1.2	OBJETIVOS	9
2.	FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES (EOFs)	11
2.1	INTRODUCCIÓN	11
2.2	DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA	11
2.3	TEORÍA DE LA DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES	13
2.4	APLICACIÓN GENERAL Y EN PARTICULAR A LAS IMÁGENES DE SATÉLITE	14
2.5	APLICACIÓN A IMÁGENES DIGITALES DE PLAYAS	15
2.5.1	INTRODUCCIÓN	15
2.5.2	APLICACIÓN A UNA IMAGEN	16
2.5.3	APLICACIÓN A UNA SERIE DE IMÁGENES	21
2.6	CONCLUSIONES	28
3.	METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	29
3.1	INTRODUCCIÓN	29
3.2	ANTECEDENTES	29
3.2.1	ANTECEDENTES DE LA DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA	30
3.2.2	ESTACIÓN DEL PUNTAL Y EL SARDINERO	34
3.3	DETECCIÓN MANUAL DE LA LÍNEA DE COSTA	37
3.3.1	METODOLOGÍA	37
3.3.2	RESULTADOS	38
3.3.3	DISCUSIONES	40
3.4	APLICACIÓN DE MODOS ESPACIALES PARA DETERMINAR LA LÍNEA DE COSTA	40
3.4.1	COMBINACIÓN DE MODOS ESPACIALES EN IMÁGENES DE LA PLAYA DEL PUNTAL PARA LOCALIZAR LA LÍNEA DE COSTA	40
3.4.2	SEGUNDO NIVEL DE APROXIMACIÓN	48
3.5	METODOLOGÍA	57
3.5.1	INTRODUCCIÓN	57
3.6	VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA	59
3.6.1	PUNTAL	59
3.6.2	SARDINERO	61
3.7	CONCLUSIONES	64

4.	ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y BARRAS INTERMAREALES DE LA PLAYA DEL PUNTAL	65
4.1	INTRODUCCIÓN	65
4.2	EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA.....	65
4.2.1	ANÁLISIS MENSUAL.....	65
4.2.2	ANÁLISIS ANUAL.....	67
4.2.3	CONCLUSIONES	69
4.3	BARRAS INTERMAREALES.....	69
4.3.1	INTRODUCCIÓN	69
4.3.2	OBJETIVO	70
4.3.3	METODOLOGÍA.....	70
4.3.4	RESULTADOS	71
4.3.5	CONCLUSIONES	85
5.	CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	86
5.1	CONCLUSIONES	86
5.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	88
	ANEXO 1:	89
	DETECCIÓN DE IMÁGENES DIURNAS Y NOCTURNAS EN EL PUNTAL Y SARDINERO	89
	ANEXO 2:	95
	DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PUNTAL Y EL SARDINERO	95
	ANEXO 3:	101
	MODOS ESPACIALES EN EL ÁREA DE ACTUACIÓN EN EL PUNTAL.....	101
	ANEXO 4:	105
	DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA MEDIANTE EL PRIMER NIVEL DE APROXIMACIÓN	105
	ANEXO 5:	111
	ESTUDIO DE POSIBILIDADES PARA EL SEGUNDO NIVEL DE APROXIMACIÓN	111
	ANEXO 6:	115
	DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PUNTAL MEDIANTE EL SEGUNDO NIVEL DE APROXIMACIÓN	115
	ANEXO 7:	120
	PRECISIÓN DE LA METODOLOGÍA	120
	ANEXO 8:	124
	DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA MEDIANTE LA METODOLOGÍA EN EL SARDINERO	124
	ANEXO 9:	128

DETECCIÓN DE LAS BARRAS Y PARAMETRIZACIÓN MEDIANTE ELIPSES.....	128
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Barras en el Puntal	7
Figura 2. Playas el Puntal y Sardinero	9
Figura 3. Esquema de obtención de los modos de una imagen.....	16
Figura 4. Representación de los canales RGB	17
Figura 5. Representación del Modo 1	18
Figura 6. Representación del Modo 2	19
Figura 7. Representación del Modo1 y Modo 2.....	19
Figura 8. Representación del Modo 3	20
Figura 9. Esquema del procedimiento de SVD para una serie de imágenes.....	22
Figura 10. Modo espacial dos frente a su variabilidad.....	23
Figura 11. Imágenes de variabilidad reducida 03/05	24
Figura 12. Imágenes con variabilidad máxima	24
Figura 13. Imagen con variabilidad baja en horas centrales.....	24
Figura 14. Resultados de la variabilidad temporal del modo U2 en el Puntal	26
Figura 15. Resultados de la variabilidad temporal del modo U2 en el Sardinero.....	27
Figura 16. Detección de la línea de costa a partir de un perfil transversal.....	30
Figura 17. Binarización de un perfil transversal.....	31
Figura 18. Aplicación del Operador Canny a un perfil transversal.....	31
Figura 19. Aplicación del modelo SDM a un perfil transversal	32
Figura 20. Aplicación del método Hough a un perfil transversal	32
Figura 21. Aplicación de ratios RGB a un perfil transversal	32
Figura 22. Aplicación del método PatronWL a un perfil transversal.....	33
Figura 23. Imagen Snap El Puntal y Sardinero.....	35
Figura 24. Imagen Timex El Puntal y Sardinero.....	35
Figura 25. Imagen Varianza El Puntal y Sardinero.....	35
Figura 26. Esquema de localización y visualización de las cámaras de El Puntal.....	36
Figura 27. Esquema de localización de las cámaras del Sardinero	36
Figura 28. Línea de costa digitalizada en el Puntal	39
Figura 29. Línea de costa digitalizada del Sardinero	39
Figura 30. Representación de los modos espaciales de las imágenes	41
Figura 31. Modos espaciales con contorno igual a cero	42
Figura 32. Modos en imágenes de El Puntal	43
Figura 33. Modos espaciales en el polígono	45
Figura 34. Histograma en el que el modo espacial dos no detecta correctamente LC.....	46
Figura 35 Histograma en el que el modo espacial 2 detecta correctamente LC	47
Figura 36. Línea de costa detectada con el primer nivel de aproximación.....	48
Figura 37. Estudio de posibilidades.....	51
Figura 38. Representación de Ucrítico frente al número de imágenes	53
Figura 39. Valores del parámetro A1	55
Figura 40. Representación A2-U2.....	55
Figura 41. Línea de costa mediante el segundo nivel de aproximación	56
Figura 42. Resultados de la metodología en el Puntal.....	60
Figura 43. Precisión de la metodología	61

Figura 44. Detección de personas mediante la metodología.....	62
Figura 45. Detección de dos líneas de costa por la metodología.....	62
Figura 46. Resultados satisfactorios de la metodología en el Sardinero	63
Figura 47. Resultados de la metodología con un 20% de resolución.....	63
Figura 48. Evolución de la línea de costa en junio	66
Figura 49. Detección de barras en la evolución de la línea de costa	67
Figura 50. Evolución de la línea de costa anual	68
Figura 51. Localización de las barras intermareales de El Puntal	69
Figura 52. Localización del punto DOW	70
Figura 53. Detección de la Barra 1 mediante la metodología y elipse.....	72
Figura 54. Detección de la Barra 2 mediante la metodología y elipse.....	73
Figura 55. Detección de la Barra 3 mediante la metodología y elipse.....	74
Figura 56. Representación de los resultados obtenidos mediante la parametrización de las barras	75
Figura 57. Variación del eje mayor de la barra 1 en el tiempo	76
Figura 58. Representación del semieje mayor de la barra 1 en el tiempo	76
Figura 59. Variación del semieje menor de la barra 1 en el tiempo	77
Figura 60. Variación del semieje mayor de la barra 2 en el tiempo.....	77
Figura 61. Representación del semieje mayor de la barra 2 en el tiempo	78
Figura 62. Variación del semieje menor de la barra 2 en el tiempo	78
Figura 63. Variación de la orientación de la barra 1 en el tiempo	79
Figura 64. Variación de la orientación de la barra 2 en el tiempo	80
Figura 65. Variación de la distancia de la barra 1 en el tiempo	80
Figura 66. Representación de la variación de la distancia de la barra 1 con la línea de costa ...	81
Figura 67. Variación de la distancia de la barra 2 en el tiempo	81
Figura 68. Representación de la variación de la distancia de la barra 2 con la línea de costa ..	82
Figura 69. Variación de la distancia de la barra 1 frente a la altura de ola significativa	83
Figura 70. Variación de la distancia de la barra 1 en el tiempo respecto a la altura de ola significante	83
Figura 71. Variación de la distancia de la barra 2 frente a la altura de ola significativa	84

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En los últimos cincuenta años la costa española ha sufrido una transformación muy significativa y se ha convertido en un ámbito estratégico para la economía española. La importancia del turismo vinculado al producto sol y playa, de la industria de la energía relacionada con el aprovisionamiento por mar de gas y de petróleo, así como el papel creciente del comercio marítimo son los factores económicos clave para entender esta transformación.

Las zonas costeras son, hoy por hoy, zonas de vital relevancia para los estados costeros, ya que albergan a la mayoría de su población, y de ellas depende un gran porcentaje de sus actividades económicas como son actividades náutico-lúdicas, industria, comercio, pesca y turismo que representa el 10.9% del PIB según el ministerio de turismo. Es por ello que en el año 2015 el gobierno español invirtió 21.5 millones de euros (Ministerio de Agricultura, 2015).

En el caso de Cantabria, que es la comunidad en la que se centra este trabajo, el turismo supone un 10'9% del PIB regional (Impactur, 2014), y el Puerto de Santander recibió 13'26 % del turismo. Además el puerto supone el 4% del PIB regional

España es el segundo país europeo con mayor índice anual de consumo de productos pesqueros, y que se sitúa en el quinto puesto del ranking mundial de importaciones, por detrás de Japón, Islandia Noruega y Portugal, y en el séptimo de exportaciones. El sector pesquero, naval e industrial- marítimo genera un gran número de empleos, tanto directos como indirectos, lo que le otorga una destacada importancia socioeconómica (Pesca, 2015).

Las playas tienen un valor recreativo, ecológico y económico incuestionable y además contribuyen en gran medida a la protección de la costa. En el caso del Puntal de Santander se produce un trasvase de arena desde la playa seca hasta la playa sumergida, formándose barras de arena. Estas barras provocan la rotura de las olas a distancias mayores de la orilla que en el estado inicial, con lo que la playa consigue autoprotgerse de futuros temporales.



Figura 1. Barras en el Puntal

Normalmente no hay suficiente información para que los gestores y técnicos puedan realizar una evaluación sobre las actuaciones a llevar a cabo en la costa. La información que se recoge de una zona de estudio es de dos tipos: una relacionada con la topografía/batimetría y otra con

el fluido en movimiento. Existe un gran interés desde el punto de vista de Gestión Integrada de Zonas Costeras (GIZC) respecto a variaciones de la batimetría.

Las variaciones batimétricas se observan en procesos de erosión, variación de la línea de costa, rebase de dunas y variaciones morfológicas de barras y canaletas de corrientes de retorno. Por otro lado, las mediciones del flujo son importantes para la caracterización morfodinámica de la zona de rompientes, el modelado de la evolución de playas mediante herramientas numéricas, la seguridad en usos recreativos de las playas, etc.

Dado que, la morfología de una playa es muy variable, ya que posee un amplio rango de escalas espacio-temporales, es muy complejo definir una estrategia de toma de datos en campo. Las variaciones morfodinámicas poseen en una escala temporal de horas a siglos y en la escala espacial de metros a cientos de kilómetros, es probablemente la zona más dinámica de todos los ambientes costeros. Esto provoca la necesidad de desarrollar técnicas de medida de alta resolución, para resolver procesos costeros de pequeña escala espacio-temporal, del orden de metros y de horas a días, y que al mismo tiempo, permitan tomar datos a largo plazo, para estudiar problemas costeros de escalas espaciales de 1-100 km y temporales de meses a décadas.

Los métodos tradicionales de medida en el campo implican el uso de embarcaciones, instrumentos de medición como sonar, boyas, perfiladores de corrientes etc., los cuales necesitan de grandes recursos logísticos, y a menudo no proporcionan la resolución espacio-temporal para resolver los procesos de interés.

En vista de que estos métodos tradicionales no son suficientes, se empezaron a utilizar estaciones de videocámaras con el objetivo de cubrir el déficit de información. Estas estaciones pueden ser móviles, colocando las cámaras en aviones o satélites, o fijas dejando las cámaras en algún edificio.

A partir del año 1986 se colocaron múltiples estaciones fijas, las primeras en Duck (Carolina del Norte), ya que las móviles son mucho más costosas por los medios necesarios. Estas estaciones capturaban imágenes cada cierto periodo de tiempo y eran enviadas a procesar a centros especializados.

Mientras que las imágenes captadas por satélites se han empleado en otras ramas de la ciencia como la climatología o meteorología, las cámaras de las estaciones fijas, que principalmente estaban situadas en la costa, se fueron abandonando ya que no era posible procesar la información para estudiar procesos morfodinámicos. A partir de 1997 los investigadores se vuelven a centrar en las imágenes para detectar la línea de costa y las barras mediante varios métodos que consistían en la detección de bordes como son por ejemplo el operador Canny, binarización, modelo SDM, modelo RGB, etc.

Todos los modelos conseguían detectar contornos pero había muchos factores que afectaban a los resultados como la resolución de las cámaras, no había criterios de discriminación entre agua y tierra, etc.

Como consecuencia de que los modelos de detección de contornos no consiguen la precisión necesaria en imágenes, se ha estudiado la posibilidad de aplicar la técnica que están utilizando otras ramas de la ciencia para detectar información en imágenes de satélite.

La técnica empleada son las Funciones Empíricas Ortogonales, que consiste en un método matemático que analiza la variabilidad espacio-temporal de un conjunto de datos.

Esta técnica no ha sido empleada en playas y se cree que puede ser útil para analizar la variabilidad espacio-temporal de las imágenes y así definir los contornos de las barras intermareales y la línea de costa y de esta forma estudiar las variaciones batimétricas.

Actualmente existen estaciones fijas de video cámaras que captan imágenes de alta precisión y que permiten visualizar las variaciones morfológicas, como son formación y destrucción de barras o variaciones en la línea de costa.

Algún ejemplo de estaciones fijas de alta precisión en Cantabria son las que se encuentran en El Puntal de Somo y el Sardinero. Las imágenes permiten seguir estas modificaciones de la costa desde horas hasta meses o incluso años, y permiten abarcar pequeñas áreas, de metros, hasta kilómetros. Además no requieren de gran instrumentación ya que sólo es necesario una cámara fotográfica con calidad y un sistema informático para el almacenamiento de las fotografías.



Figura 2. Playas el Puntal y Sardinero

Por tanto el objetivo es aplicar la técnica de las Funciones Empíricas Ortogonales, empleadas en otras áreas científicas, para analizar la evolución de la costa y poder mejorar los sistemas de gestión de la misma, como puede ser: crear un programa de restauración de playas, planificar el dragado de la canal, conocer el área disponible de playa seca, en pleamar y bajamar, y de esta forma poder estimar el aforo de la playa.

1.2 OBJETIVOS

Investigar las posibilidades de la aplicación de la técnica de funciones empíricas ortogonales en el análisis de imágenes de playas. En particular se plantea aplicar la técnica para la detección de líneas de costa y su aplicación para la obtención de batimetría.

Los objetivos particulares son:

- Profundización en el estado del arte del uso de funciones empíricas ortogonales a imágenes
- Implementación de la técnica de funciones empíricas ortogonales para su aplicación a imágenes digitales de playas
- Análisis de los modos espaciales y temporales de series de imágenes digitales de playas en busca de posibles aplicaciones en el ámbito de ingeniería de costas
- Desarrollo de una metodología para determinar la línea de costa a partir de los modos espaciales
- Aplicación y validación de la técnica en una playa
- Aplicación de la metodología para determinar la evolución de barras intermareales.

2. FUNCIONES EMPÍRICAS ORTOGONALES (EOFs)

2.1 INTRODUCCIÓN

Las funciones empíricas ortogonales, o también conocidas como autofunciones, son una herramienta matemática que se suele emplear para analizar la variabilidad espacio-temporal de distintos fenómenos físicos.

Ha sido utilizado principalmente en oceanografía, meteorología y climatología para realizar estudios de precipitación, temperatura o fenómenos climatológicos como El Niño.

En imágenes de satélite se han aplicado para estudiar los perfiles transversales de playas, contenidos atmosféricos de ciertas sustancias, caracterizar superficies, etc.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

Las funciones empíricas ortogonales surgen al intentar resolver un sistema de ecuaciones lineales sujetas a unas determinadas condiciones de contorno. Cuya solución existe solo para determinados valores, denominados autovalores.

Consiste en un método para analizar la variabilidad espacial y temporal de los campos geofísicos. El método encuentra las componentes principales de variabilidad, su tiempo de variación y da una idea de la importancia de cada componente. Se trata de un método matricial, por tanto la información se debe expresar de forma matricial.

Si tenemos series temporales de datos en las posiciones x_1, x_2, \dots, x_p para los tiempos t_1, t_2, \dots, t_n . Por tanto para cada tiempo t_j ($j=1, \dots, n$) podemos suponer a las mediciones x_i ($i=1, \dots, p$) como un mapa o campo.

Si almacenamos estas mediciones en una matriz F como n mapas, siendo cada mapa de p longitud, y organizamos cada mapa como una fila en la matriz, obtenemos una matriz F de $n \times p$.

$$F = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto se puede interpretar cada columna p como una serie de tiempo para una localización dada.

El análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) se realiza usando F como la matriz de datos.

Para obtener las EOFs, se forma la matriz covarianza de F como $R = F^t F$ y se resuelve el problema de los valores propios.

$$RC = CA$$

Siendo Λ la matriz diagonal que contiene los valores principales λ_i de la matriz R; y C es una matriz ortogonal, por tanto cumple la condición $C^{-1} = C^t$, de forma que R se puede escribir como:

$$R = C\Lambda C^t$$

Tanto la matriz C como Λ poseen las dimensiones de $n \times p$

Las columnas c_i de C son los autovectores de R correspondientes a los autovalores λ_i , es decir, para cada valor propio λ_i hay un autovector c_i .

Los autovectores son las EOFs que se buscaban (modos espaciales). Si asumimos que los autovectores se ordenan en función del tamaño del valor propio, la EOF₁ está asociada al mayor autovalor, la EOF₂ está asociada al segundo mayor autovalor y así sucesivamente. Cada valor propio o autovalor λ_i representa la proporción de la varianza total de R.

La matriz C, además de ser ortogonal, tiene la propiedad de que $C^t C = C C^t = I$, esto significa que las EOFs son independientes en el espacio, o lo que es lo mismo, los autovectores son ortogonales entre ellos.

Los autovalores y autovectores cumplen las siguientes propiedades

- Los autovalores de una matriz real simétrica son todos reales.
- Dos autovectores asociados a dos autovalores distintos son ortogonales.
- Una matriz real simétrica de dimensiones $n \times n$ tiene n autovectores independientes.
- Si la matriz además de simétrica y real es definida positiva, entonces sus autovalores son todos positivos.

El patrón obtenido cuando un modo empírico (EOF) es pintado como un mapa, representa una oscilación estacionaria. La evolución en el tiempo de un modo empírico (EOF) muestra como ese patrón oscila en el tiempo. Para ver como 'evoluciona' este modo empírico calculamos:

$$\vec{a}_1 = F \vec{c}_1$$

Entonces, la n -ésima componente del vector a_1 son las proyecciones de los mapas en F del EOF₁ y el vector es la serie temporal de evolución del EOF₁. En general, para cada EOF _{j} calculado podemos encontrar un a_j . Estos son las series de componentes principales (PC's) o los coeficientes de expansión de los EOFs. Ya que los EOFs no están correlacionados en el espacio, los coeficientes de expansión tampoco están correlacionados en el tiempo.

Un modo empírico se puede reconstruir con:

$$F = \sum_{j=1}^p \vec{a}_j (EOF_j)$$

Como se ha mencionado anteriormente, los primeros N autovectores recogen el comportamiento dinámico del sistema (mayor variabilidad), y el resto de autovectores, que se

corresponden a autovalores menores, son “ruido”, variabilidad aleatoria. Por tanto se pueden emplear las EOFs para reconstruir la serie de datos con los autovalores mayores, obteniendo una versión más “limpia”, sólo con las componentes con mayor variabilidad y más representativas de la serie. (H.Björnsson & Venegas, 1997)

De forma esquemática el procedimiento para obtener las funciones empíricas ortogonales es el siguiente:

- Construir la matriz F
- Calcular la matriz covarianza como $R = F^t F$
- Resolver el sistema $R = C\Lambda C^t$, obteniendo los autovectores y autovalores
- Calcular las componentes principales como $\vec{a}_j = F \times EOF_j$

En este apartado se ha explicado cómo obtener las Funciones Empíricas Ortogonales a partir de la matriz covarianza y después obtener los autovectores y autovalores, pero existe otra metodología que es la Descomposición de Valores Singulares que no necesita calcular la matriz covarianza y que se desarrolla en el siguiente punto.

2.3 TEORÍA DE LA DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES

La Descomposición en Valores Singulares es un método de descomposición general, que descompone cualquier matriz de $m \times n$ elementos de la siguiente forma:

$$F = USV^t$$

Donde U es una matriz de $n \times n$ ortonormal, es decir, $U^t U = I$ de, V es una matriz ortonormal de $m \times m$ y S es una matriz diagonal de $m \times n$ con σ_n elementos en la diagonal ($\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_n$). Los elementos de la diagonal de S son los denominados valores singulares. Las columnas de las matrices U y V contienen los vectores singulares de F .

Si $r = rg(F)$, y este es deficiente, es decir, $r < n$, se obtendrán $n - r$ valores singulares nulos.

$$(\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_n = 0).$$

Para ver la relación entre la Descomposición en Valores Singulares y las Funciones Empíricas Ortogonales, consideramos F como la matriz de datos, eliminada ya la media, y la matriz covarianza R se define como $R = F^t F$.

Del método de las Funciones Empíricas Ortogonales (apartado 2.2) se dedujo que

$$R = C\Lambda C^t$$

Pero si primero se realiza la Descomposición en Valores Singulares en F , y después se forma R se obtiene:

$$F = USV^t$$

$$R = F^t F = (USV^t)^t (USV^t) = VS^t U^t USV^t = VS^t SV^t$$

Si comparamos las formulas $R = C\Lambda C^t$; $R = VS^t SV^t$ queda claro que

$$C = V; C^t = V^t; \Lambda = S^t S$$

La correlación entre los autovalores de R y los valores singulares de F es obvia:

$$\lambda_i = \sigma_i^2$$

También se debe apreciar que los autovectores de $R = F^t F$ son los vectores columna (vectores singulares) de V.

Por tanto las Funciones Empíricas Ortogonales se pueden calcular a partir de la Descomposición en Valores Singulares y es el método que se ha empleado en este trabajo.

2.4 APLICACIÓN GENERAL Y EN PARTICULAR A LAS IMÁGENES DE SATÉLITE

El procesamiento de imágenes de satélite está teniendo gran aplicación en diversas áreas científico-tecnológicas, por ejemplo los satélites Landsat son una serie de radares que orbitan alrededor de la Tierra, grabando imágenes del terreno y de la costa cada 8 días. Las imágenes que se obtienen permiten ver cambios tanto cualitativos como cuantitativos de crecimiento de población, humedad, vegetación, etc. Cada imagen se digitaliza y se guarda en una matriz rectangular donde cada valor representa la intensidad de un pixel de la imagen. (Colombo & Lafuente, 2012)

Estas imágenes tienen gran cantidad de información y la mayoría es redundante, por lo tanto ocupa mucho espacio, es por ello que en estos casos las Funciones Empíricas Ortogonales tienen gran aplicación, ya que este método permite extraer la máxima varianza de cada componente principal, así la primera componente posee la máxima varianza posible de los datos, la segunda componente la segunda y así sucesivamente. Por tanto es una técnica eficiente para comprimir datos.

Al tratarse de imágenes de satélite, este método es de gran utilidad en meteorología, climatología y oceanografía. Algunos ejemplos de aplicación son los que se muestran a continuación.

Esta técnica se ha empleado para reducir el volumen de datos obtenidos de estaciones de precipitación, permitiendo un análisis de los mismos más eficiente. (Yesid Carvajal Escobar, 2004)

En el caso de ingeniería oceanográfica una de las posibles aplicaciones en las que se ha empleado este método, es para estudiar series temporales de batimetrías y distinguir las diferentes tendencias del perfil de playa a corto, medio y largo plazo. (Muñoz, L.Tejedor, & R.Medina, 2001)

En climatología se ha empleado para conocer el contenido atmosférico de aerosoles y contenido de fitoplancton (Pérez-Marrero, Maroto, & Llinás, 2004).

Las funciones empíricas ortogonales permiten caracterizar la superficie terrestre como una combinación lineal entre el sustrato (roca, sedimento), la vegetación (clorofila) y la parte oscura que es todo aquello ambiguo (sombras, brillos), permitiendo conocer propiedades superficiales como la cantidad de vegetación de una determinada área. (Small & Milesi, 2013)

2.5 APLICACIÓN A IMÁGENES DIGITALES DE PLAYAS

2.5.1 INTRODUCCIÓN

Una imagen digital está compuesta por píxeles y cada pixel contiene la información del color de esa porción. Los colores que almacenan los pixeles son los primarios, es decir, rojo (R), verde (G) y azul (B). De esta forma una imagen puede quedar representada por una matriz que contiene la información de los píxeles.

La matriz de píxeles viene dada por una estructura de la forma $mxnxk$, siendo mxn las dimensiones de filas y columnas y k los tres canales RGB, es decir, se obtienen tres matrices de mxn y cada una de un canal R, G o B

Para llegar a los distintos resultados del trabajo, se ha empleado como software Matlab, que en un programa matemático.



2.5.2 APLICACIÓN A UNA IMAGEN

En todas las áreas es necesario tener una unidad de medición, por ejemplo en climatología es la precipitación captada por las estaciones. En nuestro caso la unidad de medición son las imágenes captadas por las cámaras.

En cada imagen digital existen un conjunto de elementos que son de interés, por ejemplo la línea de costa, la posición de las barras, etc.

En este apartado se explora la posibilidad de aplicar la técnica de EOFs a una imagen.

Para obtener las Funciones Empíricas Ortogonales de las imágenes se emplea el método de la Descomposición en Valores Singulares (SVD). En el apartado 2.3 se ha desarrollado la teoría en general, pero hay que aplicar dicha teoría a las imágenes de las playas.

Como se ha mencionado la Descomposición de Valores Singulares es una técnica general de descomposición matricial. Para aplicarlo a imágenes es necesario expresarlas de forma matricial con estructura de $m \times n$.

En el apartado 2.5.1 se ha explicado que una imagen se puede expresar de una forma matricial en función de los canales R, G, B; pero de esta forma se obtiene una matriz con estructura $m \times n \times k$, siendo $k=3$ por los tres canales, o tres matrices R, G, B de $m \times n$.

La matriz de la imagen es tridimensional y hay que transformarla a una matriz bidimensional de $p \times q$, para ello se transforma cada canal en un vector columna y se crea de nuevo la matriz de la imagen como la unión de los tres vectores columna R, G, B.

Una vez realizada esta operación se puede aplicar la Descomposición de Valores Singulares para obtener los modos espaciales de cada imagen.

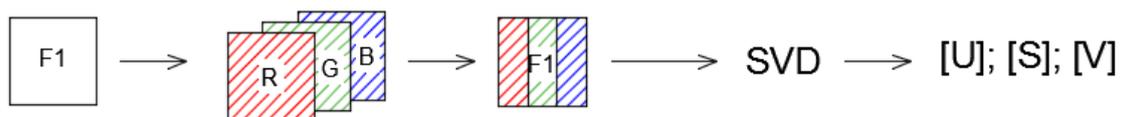


Figura 3. Esquema de obtención de los modos de una imagen

2.5.2.1 Metodología

- 1) **Lectura de imagen (F) obteniendo una matriz $m \times n \times k$ ($k=3$):** Al leer una imagen con la función *imread* de Matlab, éste transforma la información de la imagen en una matriz de $m \times n \times k$.
- 2) **Descomposición en las tres matrices R, G, B:** Se crean tres matrices, cada una de ellas tiene las dimensiones $m \times n$. La matriz R es la primera dimensión de la matriz F, la matriz G la segunda dimensión y la matriz B la tercera. Expresándolo en forma matricial:

$$R = (:, :, 1) ; G = (:, :, 2) ; B = (:, :, 3)$$

- 3) **Reconstrucción de (F) a partir de las matrices R, G, B en columnas:** Se transforma cada matriz R, G y B en vectores y se reconstruye la matriz F a partir de los tres vectores.

- 4) **Aplicación de SVD:** Al aplicar la Descomposición de Valores Singulares, a través de la función *svd* de Matlab, a una imagen ($m \times n$), se obtienen tres matrices $U(n \times n)$, $S(m \times n)$ y $V(m \times m)$. La matriz U representa los modos espaciales, la matriz S contiene los valores singulares o eigenvalores y la matriz V contiene los modos temporales.
- 5) **Obtención de los modos:** Al aplicar la función SVD se obtienen tres matrices, pero en este caso sólo es de interés la matriz que representa los modos espaciales (U). Los modos temporales no interesan porque no se está aplicando a una serie temporal, por tanto no hay una evolución en el tiempo de alguna variable.

Los puntos dos y tres son necesarios debido a que la función SVD es válida para una matriz de $m \times n$.

2.5.2.2 Resultados

Para nuestro análisis son interesantes los modos espaciales, que en este caso son tres por las tres columnas que componen la matriz F reconstruida U_1, U_2 y U_3 .

En la metodología se ha explicado que la obtención de los modos es a partir de la matriz F que está compuesta por los tres canales RGB. Si se representan los tres canales de una imagen se obtiene el siguiente resultado

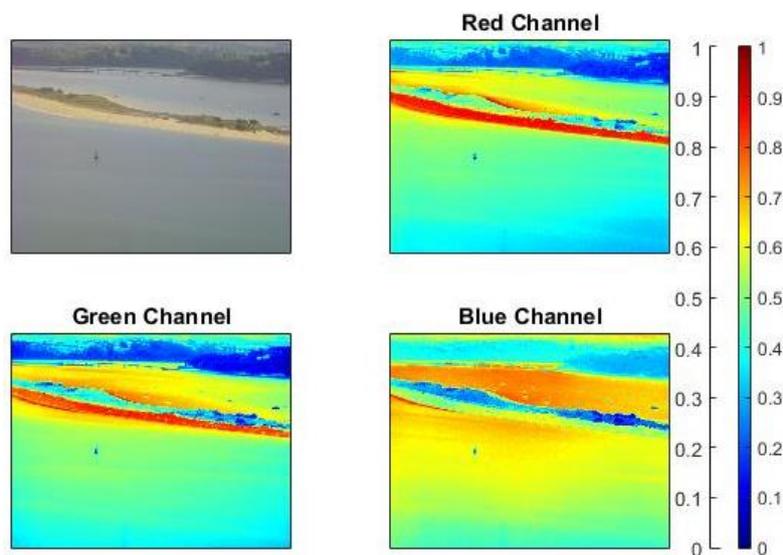


Figura 4. Representación de los canales RGB

A continuación se analizan los tres modos espaciales con el objeto de ver que representa cada uno de ellos y si están relacionados con los canales RGB

A) Modo espacial 1, U_1

El modo espacial U_1 , como se explicado en la descripción de las Funciones Empíricas Ortogonales tiene asociado el mayor autovalor. Cada autovalor representa la proporción de la varianza total, asociada al modo. El modo 1 representa un nivel de referencia, es decir, lo que es común en todos los canales RGB.

En la siguiente figura se ha representado la superficie del modo U_1 de una imagen. Se puede apreciar que todos los valores son negativos, pero hay dos franjas en los que se alcanzan los máximos. Comparando esos valores con la imagen, se aprecia que se corresponden a la playa de El Puntal y a la parte de edificios y montañas del fondo.

Por tanto el modo espacial 1 detecta las estructuras comunes o fijas.

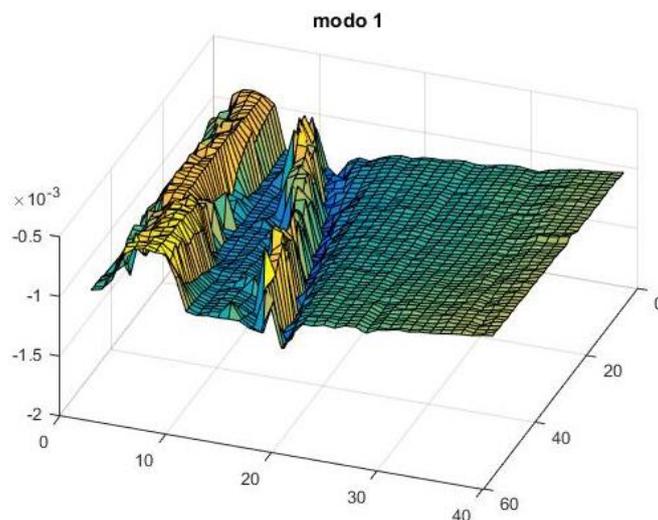


Figura 5. Representación del Modo 1

B) Modo espacial 2, U_2

Este modo posee el segundo autovalor. En la figura 6 se muestra la superficie del modo espacial 2 y se puede observar que adquiere tanto valores positivos como negativos. Representa la variabilidad máxima de la imagen, por tanto indica como varían los elementos de la imagen respecto al nivel de referencia que es el modo espacial 1.

Se advierte que los valores positivos se corresponden la zona de playa y los valores negativos son el lado mar.

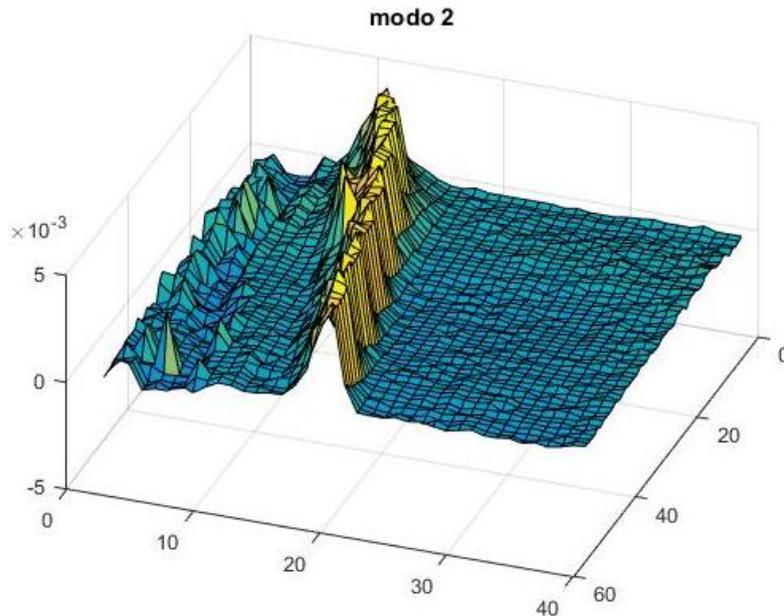


Figura 6. Representación del Modo 2

En vista de que el modo espacial dos representa cómo se comportan las cosas respecto a un plano medio que se define por el modo espacial 1, se decide representar ambos dos. El modo espacial 1 es la red inferior representada en azul claro, y el modo espacial dos es la red superior y en la que se distinguen diferentes colores desde azul a amarillo.

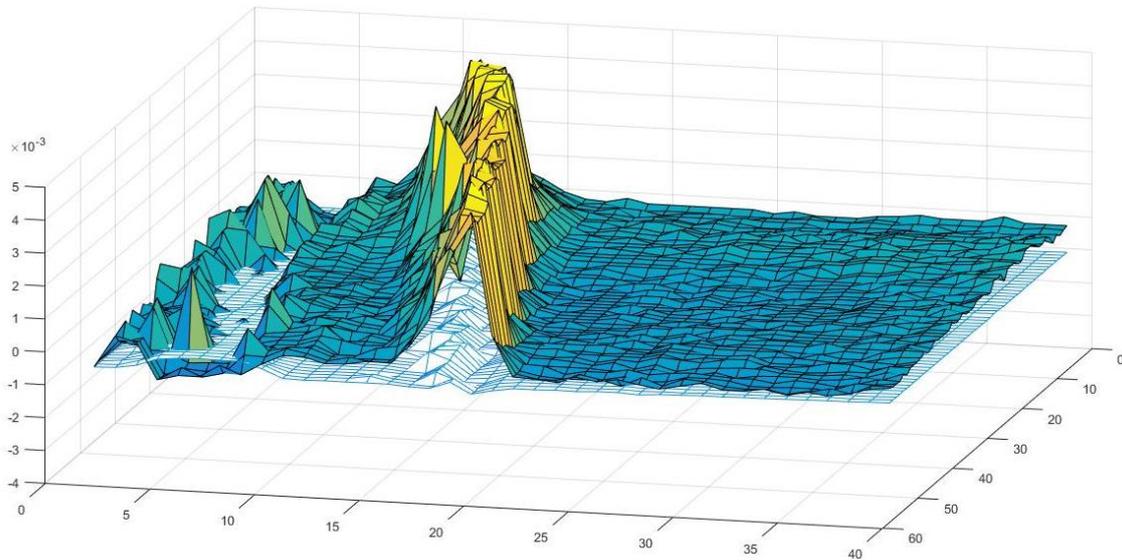


Figura 7. Representación del Modo1 y Modo 2

Se observa que cuando en una zona de la imagen el modo espacial 1 es mayor que el modo espacial 2, en esa área se encuentran las estructuras fijas como edificios, montañas, puentes, etc.

Cuando ocurre lo contrario, es decir, el modo espacial 2 es mayor que el modo espacial 1, la variabilidad es mayor, los valores máximos (amarillo) representan la zona de la playa y los mínimos (azules) representan el agua.

C) Modo espacial 3, U_3

Respecto al modo espacial 3, éste representa la variabilidad de menor escala, es decir, “ruido”. Se ve que detecta mucha información con valores mucho menores a los que adquieren los modos espaciales 1 y 2, por tanto no parece que distinga algún tipo de información en concreto.

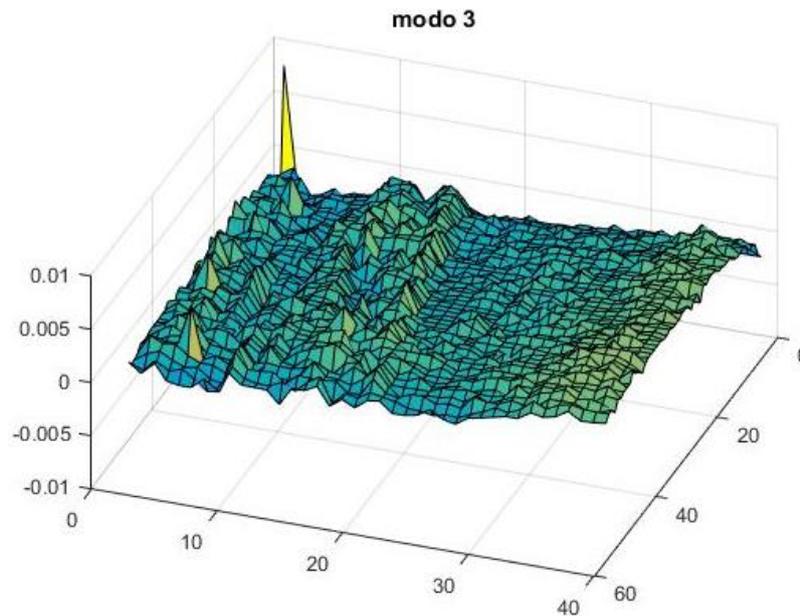


Figura 8. Representación del Modo 3

2.5.2.3 Aplicaciones

Los resultados obtenidos de la Descomposición en Valores Singulares, es decir, los modos U_1 , U_2 y U_3 permiten descartar zonas de la imagen que no son de interés representar, detectar la línea de costa y la estructura emergida y sumergida.

Si se es capaz de detectar las líneas de costa y la estructura emergida y sumergida (barras), puede ser posible definir la batimetría de la zona intermareal si a cada línea de costa se le asigna una cota.

En un principio las líneas de costa detectadas por los modos no tienen cota, pero tomando un punto de referencia en la imagen del que se sepan las coordenadas y conociendo el nivel de marea de la imagen se le puede otorgar una cota a cada línea de costa sin necesidad de tomar datos de campo.

2.5.3 APLICACIÓN A UNA SERIE DE IMÁGENES

En el apartado anterior se ha visto la aplicación de la Descomposición en Valores Singulares a una única imagen, de forma independiente, por lo que la variación temporal se descartaba. Sin embargo la información temporal se puede mantener tomando una serie de imágenes con varios intervalos como días, meses o años.

Hay que tener en cuenta que las estaciones fijas capturan las imágenes cada cierto periodo de tiempo, por ejemplo cada 10 minutos, durante todo el día, por lo que también captan imágenes nocturnas o cuando hay niebla o lluvia. Que las cámaras de video capturen estas imágenes oscuras o de peor calidad son un inconveniente ya que en ellas no se detectan bien los contornos, por lo que es necesario localizar aquellas imágenes que se puedan estudiar.

Para minimizar el número de imágenes oscuras o con niebla se ha decidido aplicar la Descomposición de Valores Singulares a una serie de imágenes de un día pero también se podría aplicar a otros periodos de tiempo como días, semanas, meses o años. De estos periodos también se podrían obtener resultados interesantes.

2.5.3.1 Metodología

Para tener en cuenta la variación temporal se han escogido las imágenes de un día de una cámara de la estación de El Puntal. Las imágenes capturadas por esta estación son cada 10 minutos.

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Lectura de la imagen(i) obteniendo la matriz F :** Se tiene una serie de imágenes desde $i=1$ hasta $i=n$, por tanto i es una imagen de la serie de longitud n . Como se ha mencionado en el apartado anterior al emplear la función *imread* de Matlab, la información de cada imagen se guarda como una matriz a la que habíamos denominado F .
- 2) Descomposición de F en las tres matrices R , G , B :** Se crean tres matrices, cada una de ellas tiene las dimensiones $m \times n$. La matriz R es la primera dimensión de la matriz F , la matriz G la segunda dimensión y la matriz B la tercera. Expresándolo en forma matricial:
$$R = (:, :, 1) ; G = (:, :, 2) ; B = (:, :, 3)$$
- 3) Reconstrucción de (F) a partir de las matrices R , G , B en columnas:** Se transforma cada matriz R , G y B en vectores y se reconstruye la matriz F a partir de los tres vectores.
- 4) Construcción de una matriz (M) que contiene en vectores columna a las matrices F :** Esta operación es necesaria porque se quiere tener en cuenta la variación temporal por lo que es necesario almacenar toda la información de un día. Como se ha explicado, la técnica de Descomposición de Valores Singulares sólo es válida en matrices bidimensionales, esto hace que sea necesario almacenar todas las matrices de cada día en una única matriz para ello se transforma cada matriz de la imagen (i) en un vector columna y se crea la matriz M como la unión de todos estos vectores columna.

5) Aplicación de SVD a la matriz M: Al aplicar la Descomposición de Valores Singulares, a través de la función *svd* de Matlab, a una imagen ($m \times n$), se obtienen tres matrices $U(n \times n)$, $S(m \times n)$ y $V(m \times m)$. La matriz U representa los modos espaciales, la matriz S contiene los valores singulares o eigenvalores y la matriz V contiene los modos temporales.

Cada columna de la matriz U , se corresponde a una imagen y contiene los tres modos espaciales U_1, U_2 y U_3 , que representaban la parte estática, la diferencia entre la estructura emergida y sumergida, y la variabilidad de menor escala respectivamente.

6) Estudio de los modos espaciales y temporales: Se quiere estudiar la variabilidad temporal de los modos espaciales. Como hemos dicho tenemos tres modos espaciales pero de ellos solamente el modo espacial dos (U_2) representa la parte variable de mayor escala, es por ello que se va a analizar su variabilidad temporal.

Para realizar esta operación se toman los modos U_2 de cada imagen y se almacenan en una matriz que vamos a llamar $U_{2,día}$. El análisis de su variabilidad temporal requiere volver a aplicar la Descomposición de Valores Singulares, pero esta vez a la matriz $U_{2,día}$. Se obtienen de nuevo tres matrices $U(n \times n)$, $S(m \times n)$ y $V(m \times m)$, ahora la matriz V representa la variabilidad temporal de $U_{2,día}$.

A modo esquemático el procedimiento de obtención de las matrices U, S, V se puede ver en la siguiente imagen

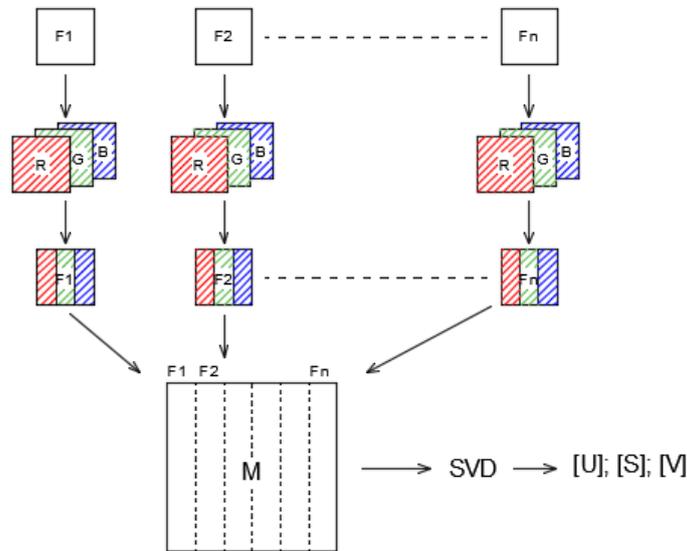


Figura 9. Esquema del procedimiento de SVD para una serie de imágenes

2.5.3.2 Resultados

Si se representa el modo espacial dos del día $U_{2,día}$ frente a su variabilidad temporal se obtienen gráficos similares al que se muestra a continuación

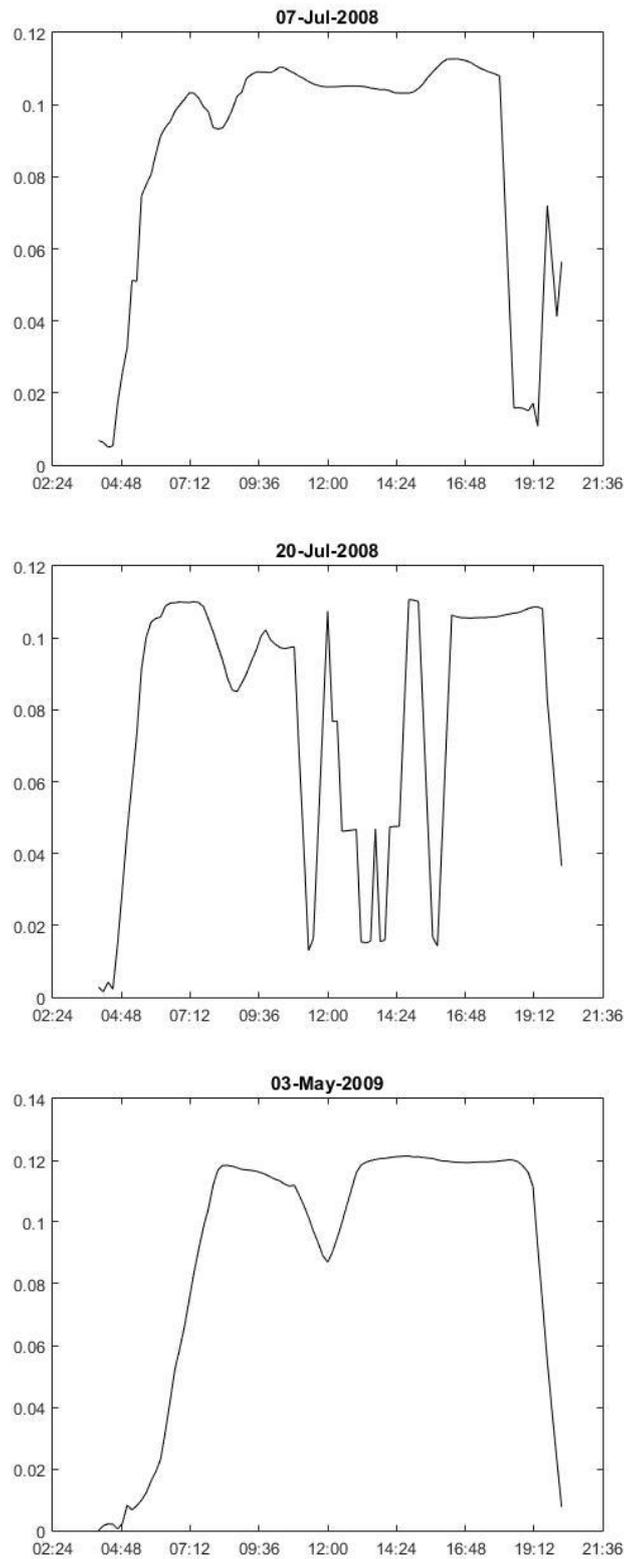


Figura 10. Modo espacial dos frente a su variabilidad

Se advierte que los valores mínimos se dan en las primeras horas del día y a última hora. A medida que avanza el día aumenta hasta que llega al máximo, que se da entre las 6 y las 8 de la mañana. A partir de ese momento se mantiene en valores elevados de variabilidad. Se intuye

que cuando las imágenes son nocturnas la variabilidad es reducida. Se han escogido algunas imágenes como ejemplo:



Figura 11. Imágenes de variabilidad reducida 03/05



Figura 12. Imágenes con variabilidad máxima

En la segunda imagen de la figura 9, se comprueba que el gráfico no es tan uniforme, hay picos que alcanzan mínimos en las horas intermedias del día, por lo que se ha decidido ver como son las imágenes a esas horas del día. Por ejemplo se ha escogido la imagen de las 11 de la mañana que es la que se muestra a continuación



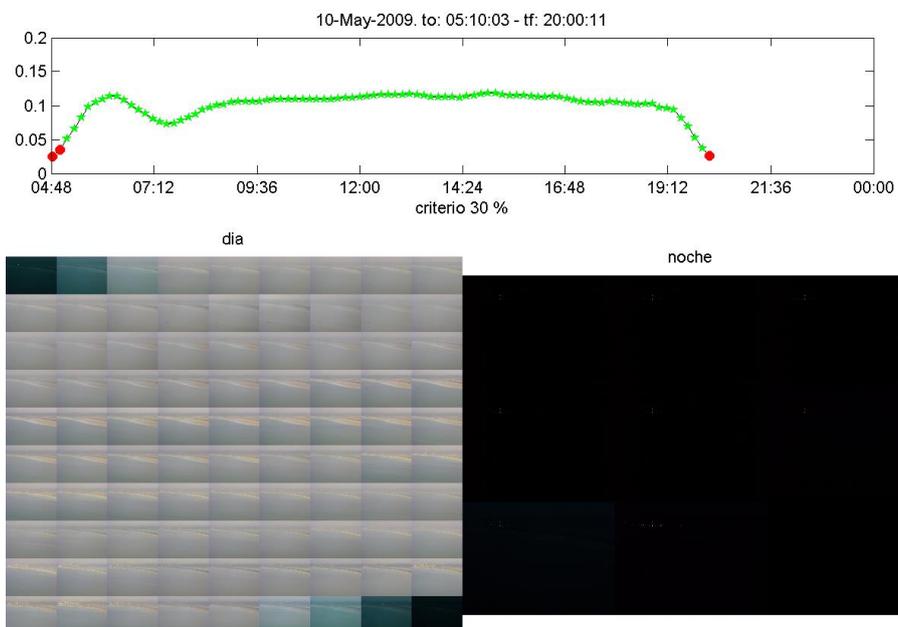
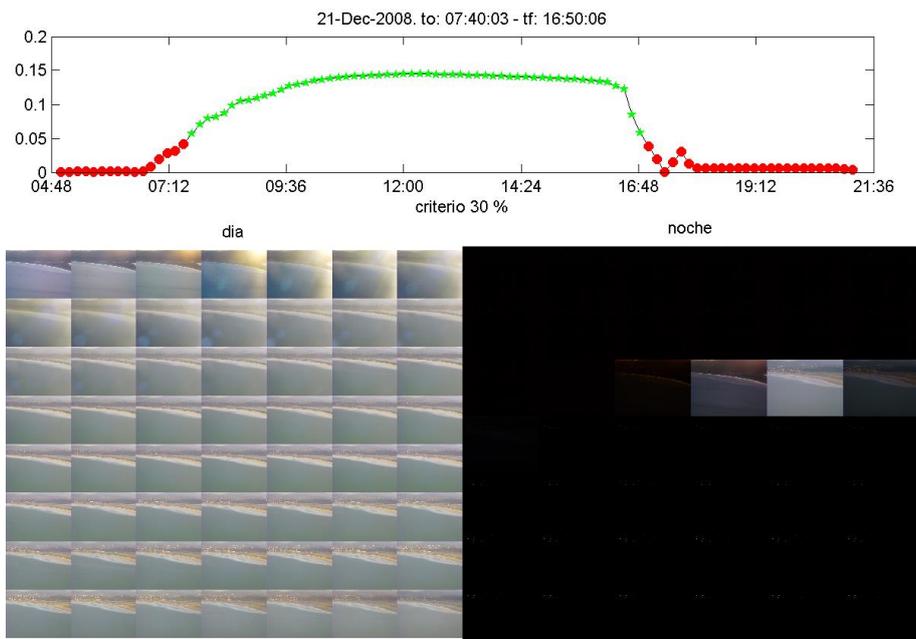
Figura 13. Imagen con variabilidad baja en horas centrales

La variabilidad temporal del modo espacial dos adquiere, en general, valores mínimos a primera y última hora del día y adquiere máximos en las horas centrales del día. Esa diferencia en el valor

de la variabilidad temporal puede ayudar a eliminar las imágenes oscuras o de mala calidad que capturan las estaciones fijas.

Se ha representado esos mismos gráficos, pero esta vez dibujando a la derecha las imágenes que adquieren valores pequeños de variabilidad, (se ha considerado como límite el 30% de la variabilidad máxima) y a la izquierda el resto.

Los nuevos gráficos son los siguientes, se han realizado en las playas El Puntal y El Sardinero.



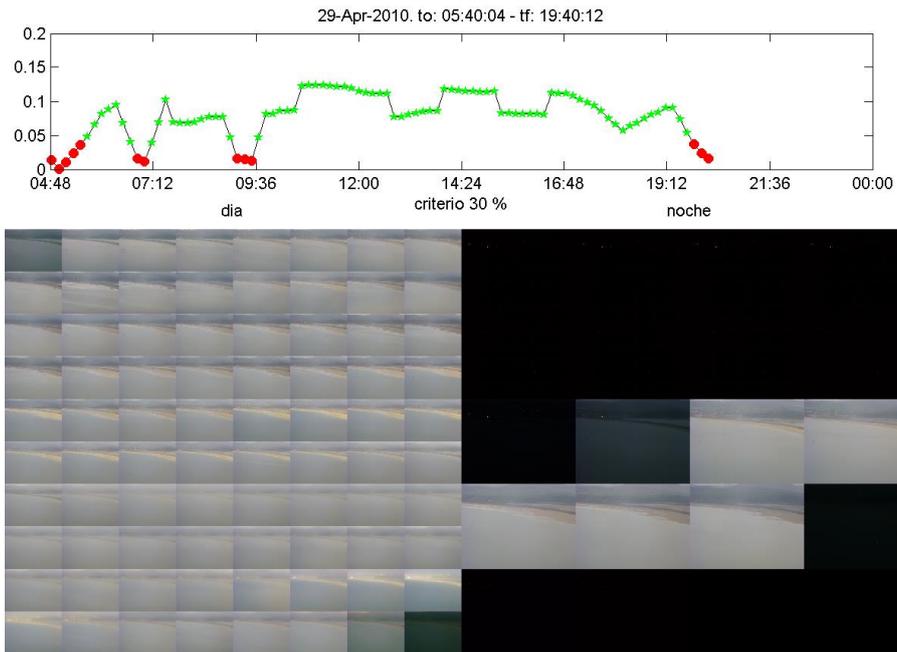
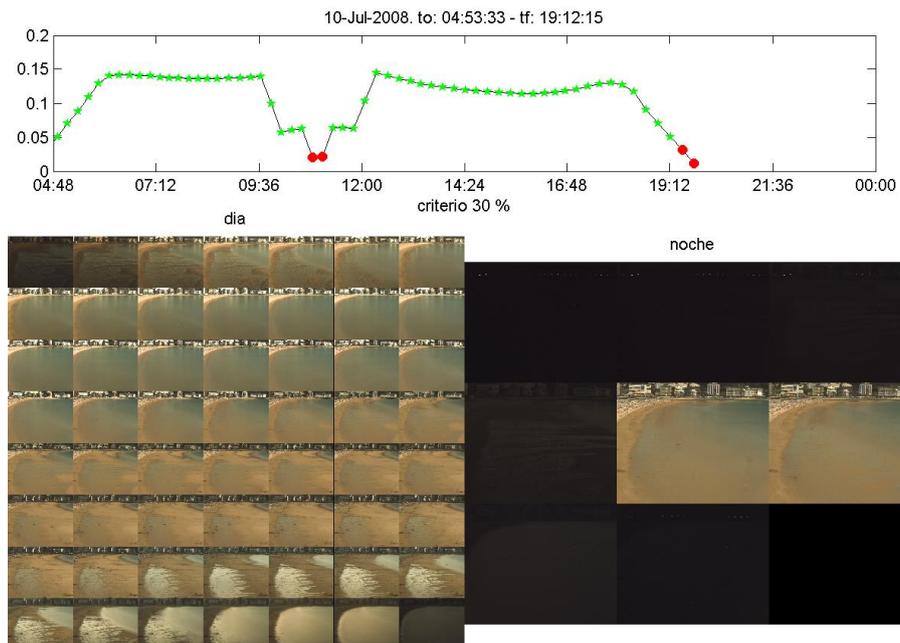


Figura 14. Resultados de la variabilidad temporal del modo U2 en el Puntal



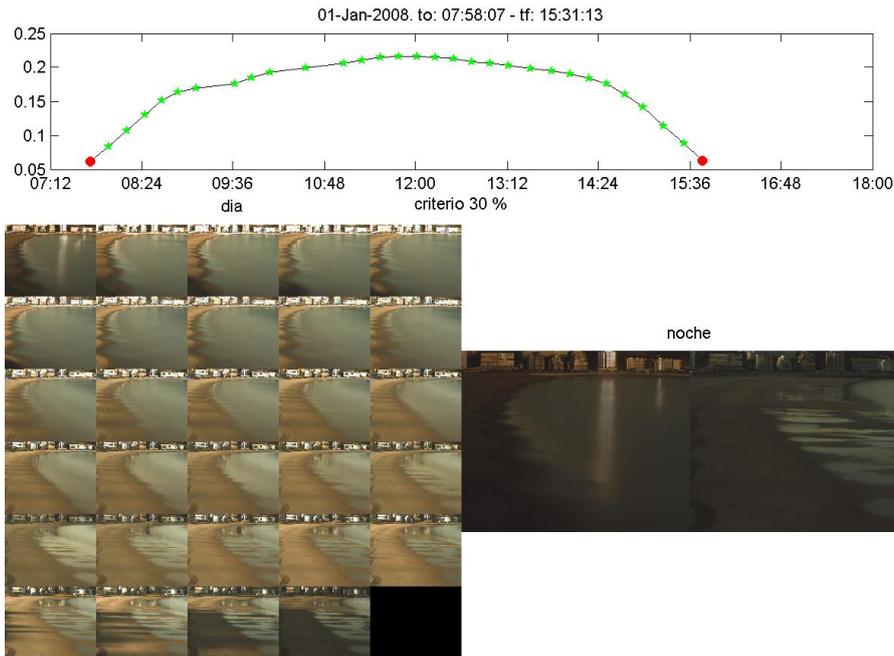


Figura 15. Resultados de la variabilidad temporal del modo U2 en el Sardinero

Se observa que la mayoría de las imágenes oscuras o borrosas se quedan a la derecha, por lo que se pueden denominar como imágenes nocturnas o no válidas y las de la izquierda imágenes diurnas o válidas.

Con estos resultados se puede concluir que la representación del modo espacial dos frente a su variabilidad temporal puede ayudar a discernir las imágenes de calidad de las no válidas con un grado de validez elevado.

En el anexo 1 se adjuntan varios resultados más de la detección de imágenes diurnas y nocturnas.

2.5.3.3 Aplicaciones

Las estaciones fijas capturan imágenes cada cierto tiempo que es definido por el usuario, pero estas estaciones no tienen sensores que discriminen las imágenes válidas de las que no tienen suficiente calidad.

Esta metodología puede ser muy útil para minimizar la cantidad de imágenes a guardar en las estaciones y para seleccionar almacenadas de una estación. Se trata de un método sencillo de ejecutar e implementar y que permite después de un día eliminar las imágenes de mala calidad.

2.6 CONCLUSIONES

Las Funciones Empíricas Ortogonales aplicadas a imágenes digitales de playa pueden ser de gran utilidad.

- 1) Se han representado los tres modos espaciales de una imagen y se llega a la conclusión de que el modo 1 es la parte común de toda la imagen por lo que representa la parte fija o constante de las imágenes, el modo espacial 2 posee la mayor variabilidad respecto al plano medio y permite distinguir la tierra del agua, por último el modo espacial 3 representa la variabilidad de menor escala de la imagen.
- 2) En vista de los resultados se ve que los modos espaciales no están relacionados con los canales RGB aunque la matriz a partir de la cual se consiguen dichos modos esté compuesta por los canales.
- 3) Se han aplicado las Funciones Empíricas Ortogonales a varias imágenes de manera individual y permiten obtener información que puede ser útil para el estudio de la evolución batimétrica en la costa. Los modos espaciales consiguen detectar contornos por lo que pueden ser empleados para definir la línea de costa y las barras intermareales.
- 4) Al conseguir definir los contornos, los modos espaciales pueden mejorar la gestión de la costa ya que no sería necesario tomar datos de campo o al menos los datos de campo servirían para verificar los contornos que detectan los modos.
- 5) Se ha aplicado a varias series de imágenes de un día en dos playas, El Puntal y El Sardinero, y se llegan a los mismos resultados. La variabilidad temporal del modo espacial dos de un día adquiere mínimos a primera y última hora del día y máximos al mediodía, por lo que permite discernir imágenes válidas y no válidas.

3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior vimos que la técnica de EOFs nos permite detectar de forma relativamente sencilla la línea de costa, por tanto en este capítulo vamos a aplicar esta técnica para desarrollar una metodología estándar para aplicar a las imágenes de una playa cualquiera.

Conocer la evolución de la línea de costa en el corto, medio y largo plazo es fundamental para entender los procesos que ocurren en la costa. Para esto se han desarrollado modelos de evolución, estilo one line. Sin embargo, siempre se han tenido problemas para tener datos suficientes a escalas espacial y temporal adecuadas. Si obtenemos una metodología que permita obtener con una certidumbre elevada la línea de costa se puede obtener información para validar modelos y datos para estudiar cualquier costa del mundo de forma económica.

3.2 ANTECEDENTES

Debido a la necesidad de cubrir grandes rangos espaciales y temporales para poder estudiar los procesos costeros se deben tomar series de datos continuas y regulares. Realizar esta toma de datos es compleja, es por ello que desde hace unas décadas se han implementado los sistemas remotos.

Muchos procesos litorales se pueden detectar visualmente como las olas, zonas de rompientes, espuma, etc. y estas están correlacionadas con corrientes, batimetrías, etc. es por ello que las imágenes pueden ayudar a estudiar los distintos procesos morfodinámicos de la costa, aunque tienen sus limitaciones en aguas muy claras que reflejan la luz o en aguas muy turbias donde sólo se puede analizar la primera capa.

Las imágenes de satélite y los sensores remotos colocados en aviones, como el sistema LIDAR, han facilitado información.

Las estaciones de cámaras fijas suministran información continuamente y a un coste mucho menor que los sistemas remotos aéreos, el inconveniente es que está limitado en el espacio ya que para garantizar una resolución la cámara debes estar a unos 4 Km del objetivo.

Con la información obtenida de las estaciones fijas se quiso estudiar la zona de ascenso/descenso y se crearon las imágenes Timex, que son un promedio de imágenes tomadas durante 10 minutos. Los resultados fueron heterogéneos pero se pudo ver una zona de rotura previa a la orilla, que parecía estar relacionada con las barras. Los investigadores Lippmann y Holman (1989), Aarninkhof (1996) y Enckevort y Ruessink (2001) se centraron en la investigación de la variación de las barras.

En 1986 se dejaron cámaras en Duck (Carolina del Norte) y las imágenes obtenidas y promediadas permitieron ampliar el conocimiento sobre las barras, haciendo evidente la necesidad de instalar más estaciones fijas para estudiar la evolución de las barras, de aquí surgió Argus.

A partir de ese año se comenzaron a instalar estaciones fijas que enviaban las imágenes por internet. Las nuevas estaciones permitieron obtener las imágenes de Varianza, que son imágenes basadas en la desviación estándar de los píxeles durante 10 minutos. Estas imágenes permiten discernir las olas rompiendo en la zona de rompientes, ya que lo que varía rápidamente se ve en blanco y las zonas invariables se ven negras.

Las imágenes permitieron conocer mejor el comportamiento de las barras y el comportamiento morfodinámico de la costa a medio-largo plazo. Se trataban las imágenes como series de datos y mediante Matlab se procesaban, pero por falta de capacidad de los ordenadores se abandonó el procesado aunque las cámaras siguieron funcionando.

Más adelante surgieron las imágenes de color con resolución 640x480 píxeles aumentando la información que suministraban las imágenes.

En el año 2002 con el proyecto CoastView Argus se regeneraron las estaciones con cámaras de 1024x768 píxeles, en escala RGB a 8 bits por canal. (Osorio, 2005)

3.2.1 ANTECEDENTES DE LA DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Con las imágenes obtenidas de las estaciones, además de estudiar la formación de barras, se intentó realizar la detección de la línea de costa, pero debido a la cantidad de factores y condiciones climatológicas se simplificó a detectar la línea de costa a partir de los perfiles transversales.

Los primeros métodos que se utilizaron para detectar la línea de costa fueron los siguientes:

- **Aproximación sencilla a partir de un perfil transversal:** Consiste en seleccionar de la imagen los valores de intensidad asociados con las coordenadas (u, v) de cada píxel, a lo largo del perfil dado, y ver las variaciones en los valores.

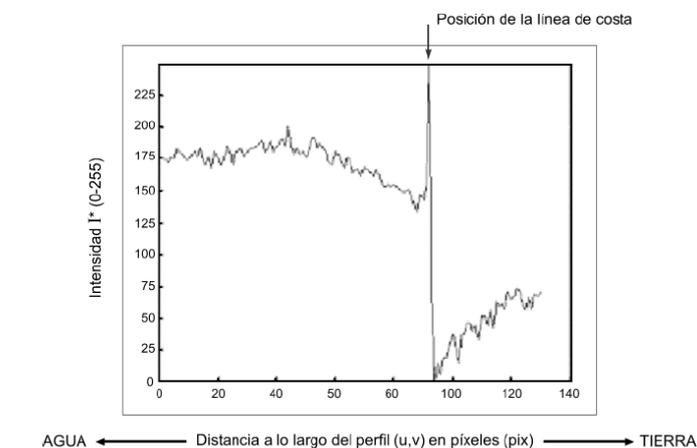


Figura 16. Detección de la línea de costa a partir de un perfil transversal

- **Detección de bordes:** la detección de bordes se basa en detectar discontinuidades locales. En el caso de las imágenes, la línea de costa, que es un borde, se puede detectar como el cambio de intensidad de los píxel. Por tanto la discontinuidad se puede representar matemáticamente como un gradiente de valor elevado.
- **Binarización:** Consiste en pasar la intensidad de los píxeles a valores 0 o 1, se consigue definiendo un umbral, entonces los píxeles por debajo del umbral adquieren valor de 0 y los que lo superan, valor 1.

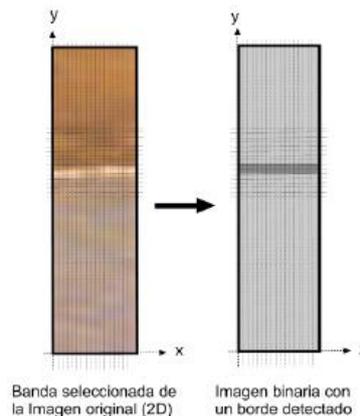


Figura 17. Binarización de un perfil transversal

- **Operador Canny:** está basado en el análisis de paso por ceros y se basa en tres criterios: criterio de detección, criterio de localización y criterio de respuesta. Este operador encuentra varios bordes ya que es más sensible.

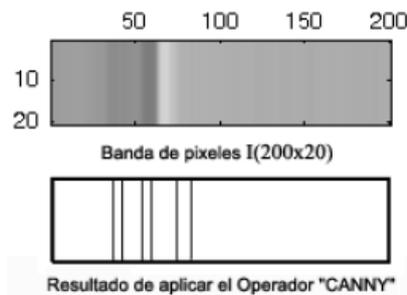


Figura 18. Aplicación del Operador Canny a un perfil transversal

- **Modelo SDM:** Este modelo se basa en la técnica conocida como PIC (Píxel Intensity Clustering), la cual intenta diferenciar el color entre las zonas de arena seca y húmeda. Transforma la información de color de los canales RGB (Red, Green, Blue) a HSV (Hue, Saturation, Value), donde se almacena de manera independiente la información de color (H y S) y la de luminosidad (V).

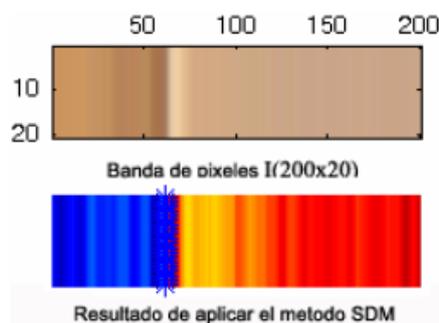


Figura 19. Aplicación del modelo SDM a un perfil transversal

- Método Hough:** La línea de costa sobre la banda de sub-banda seleccionada puede ser representada por medio de una curva (recta para el caso de una banda pequeña). En este caso la transformada de Hough es un método destinado a la detección de curvas fácilmente parametrizables en imágenes.

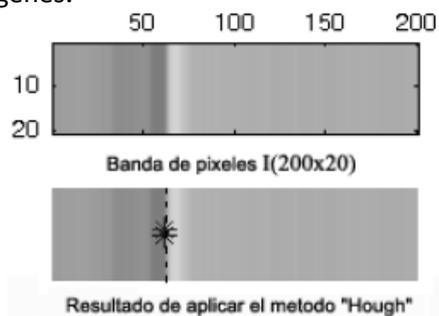


Figura 20. Aplicación del método Hough a un perfil transversal

Todos estos métodos están pensados para detectar bordes en una imagen, pero la línea de costa es un borde concreto, por lo que surgieron nuevos métodos que integraban varios de los conceptos de detección de contornos para conseguir nuestro objetivo.

- Método de ratios RGB:** selecciona una línea de píxeles correspondiente con la zona donde está definido el perfil de playa, y calcula un ratio a partir de la combinación de los canales de colores (RGB).

$$Ratio = \frac{R - G - B}{R + G + B} \quad \text{Si } 0 \leq R, G, B \leq 255 ; -1 \leq ratio \leq 1$$

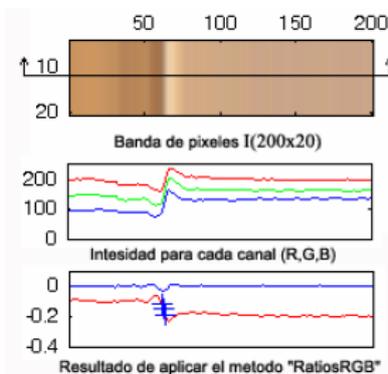


Figura 21. Aplicación de ratios RGB a un perfil transversal

- Método “PatrónWL”:** Este método intenta hacer coincidir la función que describe la imagen con un modelo paramétrico de bordes conocido. Primero transforma los canales RGB a HSV, a continuación se estiman los patrones de colores en la zona de tierra y la zona de agua. Se define el valor medio de la intensidad de los píxeles de la zona tierra (ΔL) y zona agua (ΔW). A continuación se aplica la fórmula del ratio sobre cada pixel de la subbanda.

$$g_{RtatiowL}(HSV) = \frac{|I_{ij} - L_{HSV}|}{|I_{ij} - L_{HSV}| + |I_{ij} - W_{HSV}|}$$

Los valores del ratio del lado tierra tienden a cero y los del lado agua a 1. Se repite el proceso para varios ΔL y ΔW y se encuentran las posiciones de los posibles bordes.

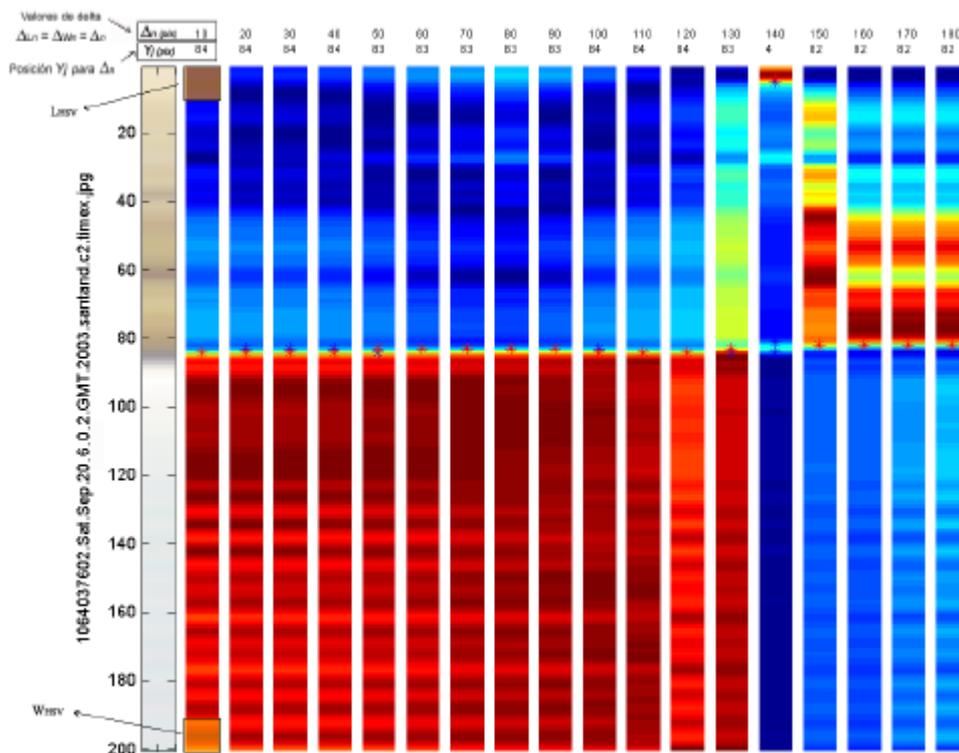


Figura 22. Aplicación del método PatrónWL a un perfil transversal

Por último se define su fiabilidad como:

$$fiabilidad(y) = b_{pj} / B_p$$

Donde:

p=intervalo de datos selecciones

b_{pj} : número de bordes encontrados en la posición yj para el intervalo p

B_p : todos los bordes encontrados para el intervalo p

El valor de fiabilidad representa el porcentaje de veces que se ha encontrado un borde en un intervalo. Si el valor es 1 significa que todos los bordes encontrados se encuentran en la misma posición y si tiende a 0 es porque hay muchos bordes encontrados en diferentes posiciones.

- **Modelo PSDM:** Combina 6 diferentes algoritmos para reconocimiento de contornos en imágenes, asignando a cada uno de ellos criterios físicos y estadísticos. Los algoritmos aplican técnicas Sobel, Canny, SDM, Hough, Ratios RGB y PatronWL. Se estima la precisión de cada algoritmo respecto a los datos medidos manualmente y se determina el error en píxeles entre cada método y las medidas manuales. Se calcula también la desviación estándar, la media y la correlación de los datos por medio de R^2 . (Osorio, 2005)

Todos los métodos explicados detectan la línea de costa como un contorno, el inconveniente que tienen es que dependen de factores como la resolución de las cámaras, la sensibilidad de los operadores que son capaces de detectar varios contornos pero no únicamente la línea de costa y no tienen criterios de discriminación entre tierra y agua. Además el último modelo (PSDM) consigue una correlación elevada, del 92%, el inconveniente es que el error es de 2.5m aproximadamente.

Los inconvenientes mencionados provocan un interés en crear otra herramienta automática que corrija estos defectos y detecte más fácilmente y con mayor precisión la línea de costa.

3.2.2 ESTACIÓN DEL PUNTAL Y EL SARDINERO

Una estación de cámaras de video generalmente se compone de un conjunto de cámaras situadas entre 3-6 Km de la costa y abarcan 180° cada una. Normalmente la toma de imágenes es cada hora aunque se puede modificar.

Las imágenes que es capaz de captar el sistema de cámaras de video son de tres tipos:

- **Fotografía instantánea (Snap):** Imagen instantánea de una zona de la playa
- **Imagen con tiempo de exposición (Timex):** Promedio de las imágenes tomadas cada 10 minutos, de tal forma que muestra la intensidad media vista por las cámaras
- **Varianza de las imágenes (Var):** Representa la variación de la intensidad de los píxeles en el periodo observado de 10 minutos.

A continuación se muestran ejemplos de este tipo de imágenes



Figura 23. Imagen Snap El Puntal y Sardinero



Figura 24. Imagen Timex El Puntal y Sardinero

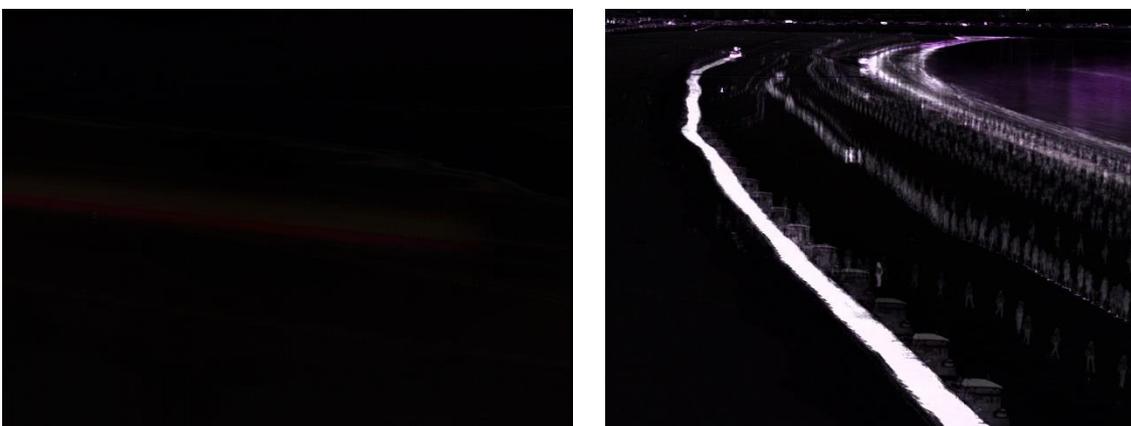


Figura 25. Imagen Varianza El Puntal y Sardinero

Se observa que en las imágenes Timex la parte variable como personas andando, barcos, etc. desaparece. En cambio en las imágenes Varianza se ve la progresión del movimiento.

La estación de cámaras de video para captar imágenes de El Puntal se sitúa en el Hotel Real de Santander. Está compuesta por cuatro cámaras, cuya resolución es de 1024x768 píxeles en escala RGB con 8 bits por canal. Esta estación está en funcionamiento desde el año 2007

La cámara 4 capta imágenes del extremo del Puntal y está situada aproximadamente a 980m del objetivo, la cámara 3 capta la parte final y está situada aproximadamente a 1Km del objetivo, la

cámara 2 la parte central y está situada aproximadamente a 1.5Km del objetivo, y la cámara 1 el inicio y está situada aproximadamente a 2Km del objetivo.



Figura 26. Esquema de localización y visualización de las cámaras de El Puntal

La estación de cámaras de video para captar imágenes del Sardinero se sitúa en varios puntos próximos a la playa. Está compuesta por 8 cámaras, cuya resolución es de 1024x1022 píxeles en escala RGB con 8 bits por canal, mayor que la estación de El Puntal.

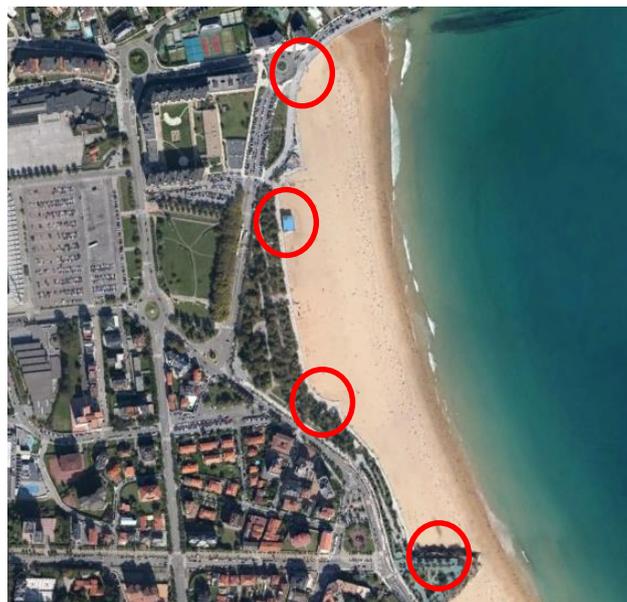


Figura 27. Esquema de localización de las cámaras del Sardinero

3.3 DETECCIÓN MANUAL DE LA LÍNEA DE COSTA

Para poder realizar el modelo de detección automática de la línea de costa a partir de los modos obtenidos con la Descomposición de Valores Singulares, es necesario crear una herramienta o método que permita comparar resultados y porcentajes de acierto. Es por ello que surge la idea de detección manual de la línea de costa que son simplemente una serie de puntos detectados manualmente y que se unen linealmente.

El objetivo fundamental de tener líneas de costa digitalizadas manualmente es validar la detección de las líneas de costa mediante la aplicación de los modos espaciales. Además permite ajustar el modelo por una comparación visual entre la línea de costa digitalizada y la detectada por los modos.

3.3.1 METODOLOGÍA

De las imágenes que es capaz de captar la estación, se emplean las tipo Timex, esta decisión se debe a que las Snap son instantáneas por lo que representan un momento y no se puede conocer oleaje, runup, swash, etc.

Al promediar las imágenes se filtran los procesos con periodos menores al promedio como runup y se observan estructuras sumergidas que se evidencian por la espuma de la rotura del oleaje y que pueden ser estudiadas.

Para tener líneas de costa digitalizadas, se realizó un programa en Matlab cuyos pasos son los siguientes:

- 1) **Discriminación de imágenes no válidas:** Dado que las imágenes que se tenían son de años anteriores, no se habían eliminado las imágenes de baja calidad por lo que hubo que discriminarlas. Para definir qué imágenes eran válidas se aplicó el procedimiento que se ha explicado en el apartado anterior. Se representó el modo espacial dos de cada día frente a la variabilidad temporal diaria y se discriminaron las imágenes considerando que si la variabilidad de la imagen era menor del 30% de la variabilidad máxima no era de calidad.
- 2) **Selección de imágenes a digitalizar:** Como el objetivo es tener datos para poder contrastar posteriormente la metodología se realizó una selección aleatoria, desde el año 2008 al 2012, de las imágenes de calidad a cualquier nivel de marea. De esta forma se cubre un amplio espectro de posibilidades de la playa. El número de imágenes no es fijo y lo decide el usuario, en este caso se definieron 200 líneas de costa.
- 3) **Lectura de imágenes seleccionadas:** Las imágenes que se vayan a digitalizar se leen con la función *imread*.
- 4) **Representación de la línea de costa a partir de puntos clicados sobre la imagen leída:** Se crea un programa con la función *ginput* en Matlab que permite introducir puntos, de esta forma se representa la línea de costa clicando puntos sobre la imagen. En este caso

se ha realizado sobre la totalidad de la imagen, pero se puede realizar sobre una sección de la imagen si la zona de estudio se encuentra en una parte de la imagen.

- 5) **Almacenaje de los puntos que representan la línea de costa (LC) en forma matricial:** La función *ginput* de Matlab, además de permitir introducir puntos, almacena sus coordenadas (x, y) , de esta forma se obtiene la línea de costa en forma matricial. Se crea una matriz del tamaño de la imagen en el que se distinga la línea de costa, para ello se le impone el valor 0 a las coordenadas de la línea de costa, 1 a la zona de tierra (parte superior de la imagen) y -1 a la zona mar (parte inferior de la imagen).

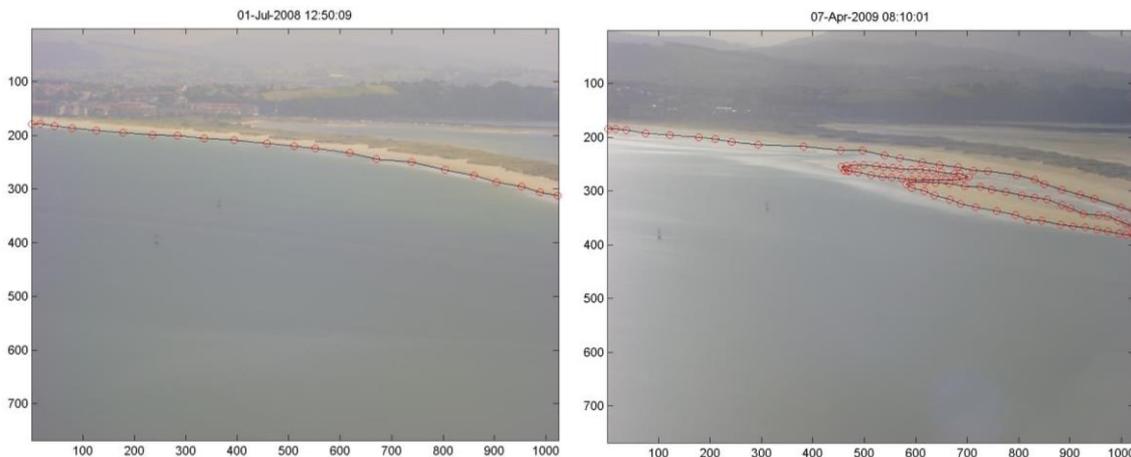
3.3.2 RESULTADOS

Se determinaron 200 líneas de costa digitalizadas de El Puntal y 50 del Sardinero. Las imágenes se seleccionaron aleatoriamente de las imágenes válidas tipo Timex, por lo que hay imágenes desde pleamar a bajamar.

El número de imágenes se considera suficiente para comparar los resultados de la metodología para una serie de un año.

Mediante la metodología se puede detectar además de la línea de costa las barras intermareales.

Algunos ejemplos de la línea de costa detectada son los siguientes:



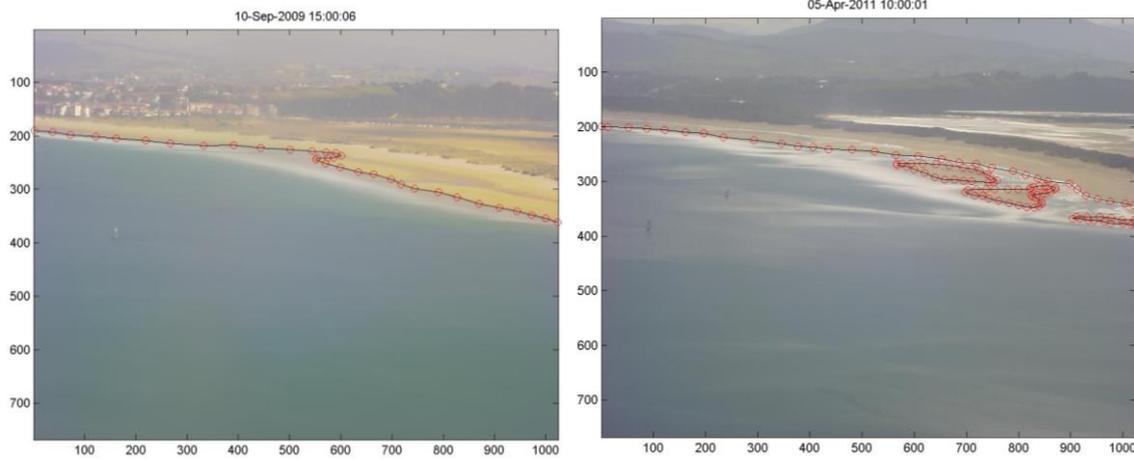


Figura 28. Línea de costa digitalizada en el Puntal

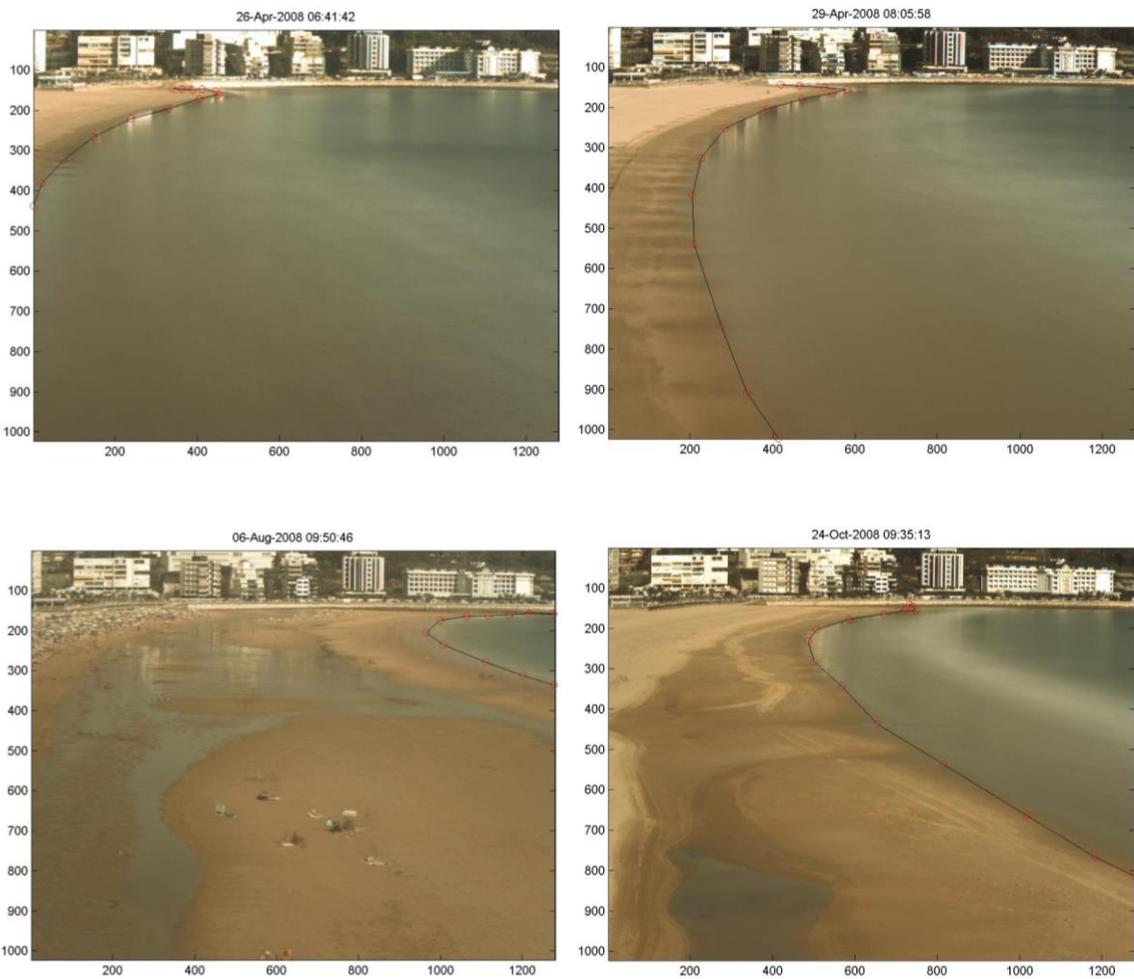


Figura 29. Línea de costa digitalizada del Sardinero

Esta técnica de digitalización permite obtener líneas de costa y barras de forma sencilla y precisa.

El anexo 2 se incluye líneas de costa digitalizadas a mano.

3.3.3 DISCUSIONES

Las líneas de costa digitalizadas manualmente son en definitiva una herramienta que van a permitir visualizar si modos espaciales son un buen método para detectar la línea de costa.

También pueden dar una idea de la precisión en metros del método teniendo en cuenta el tamaño de cada píxel.

Se habla de precisión y no de error por los motivos que se exponen a continuación:

- La línea de costa digitalizada manualmente surge de una percepción visual del límite de la línea de costa.
- El número de puntos de la línea de costa es mucho menor que la que resulta de los modos espaciales. Las líneas de costa digitalizadas manualmente rondan los 20-40 puntos en función de la imagen, en cambio los modos dan 1600-1900 puntos.
- La precisión a la hora de definir un punto en una imagen de 1024x768 píxeles a una distancia de 2Km es relativa.
- Las imágenes no están abatidas en planta por lo que la exactitud de los puntos más lejanos puede disminuir.

3.4 APLICACIÓN DE MODOS ESPACIALES PARA DETERMINAR LA LÍNEA DE COSTA

Se ha mencionado en apartados anteriores que realizando la Descomposición de Valores Singulares se obtienen tres modos espaciales, en los que el modo 1 representa la parte fija, el modo 2 distingue la tierra del agua y el modo 3 es la variabilidad de menor escala.

El objetivo es generar una metodología estándar que se pueda aplicar a imágenes en tiempo real de cualquier estación o conjunto de imágenes para determinar la línea de costa.

3.4.1 COMBINACIÓN DE MODOS ESPACIALES EN IMÁGENES DE LA PLAYA DEL PUNTAL PARA LOCALIZAR LA LÍNEA DE COSTA

En este apartado se pretende ver que modos o combinación de los mismos es el más adecuado para definir la línea de costa y así poder realizar una metodología automática.

A) Análisis de los modos espaciales directamente sobre la imagen

Representando los modos espaciales de las imágenes obtenemos las siguientes figuras:

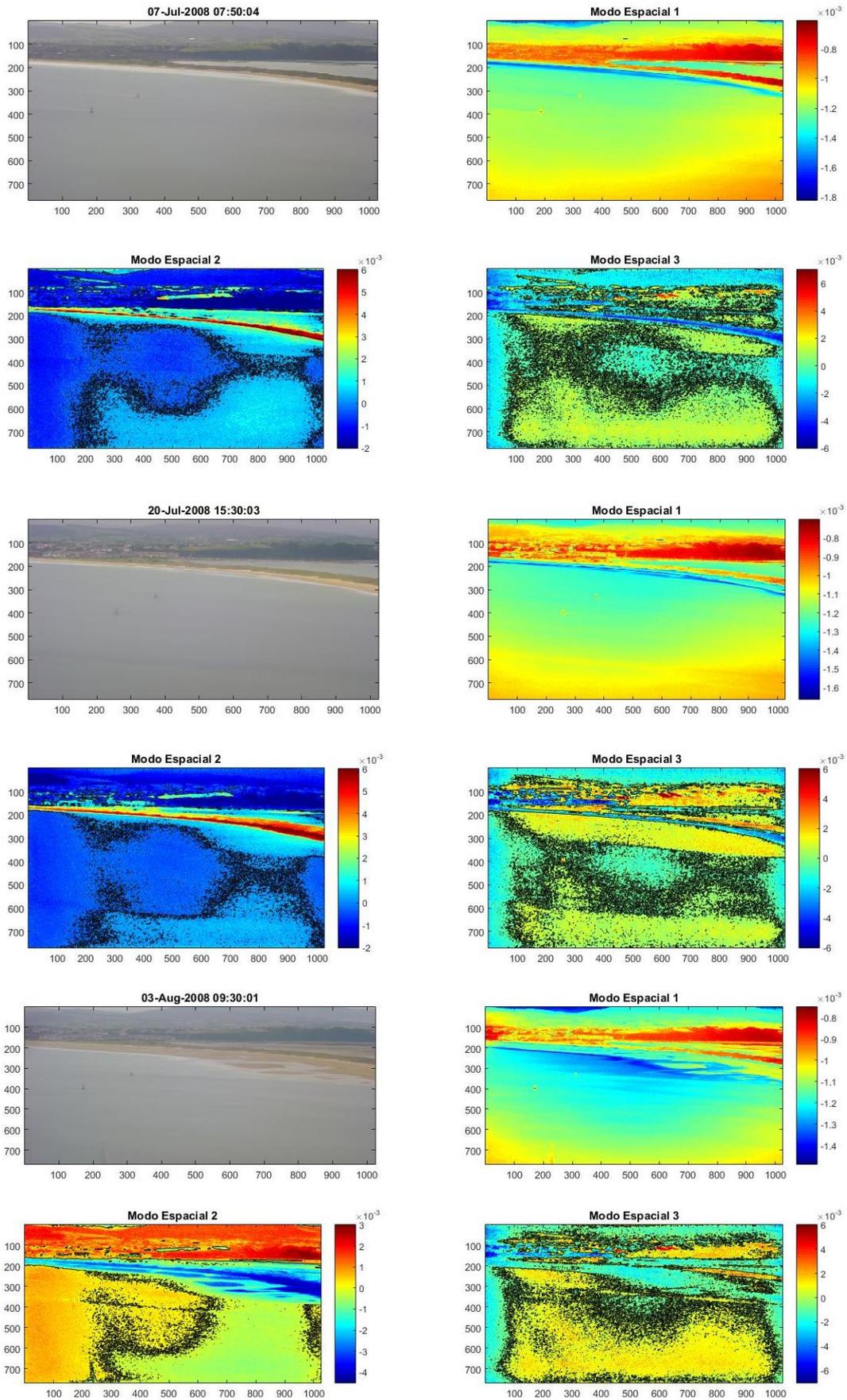


Figura 30. Representación de los modos espaciales de las imágenes

De los gráficos obtenidos se verifica que el modo espacial 1 (U_1) muestra la media de los valores de RGB, es decir, lo que aparece en los tres colores. El modo espacial 2 (U_2) la zona de playa del mar y la estructura emergida (barras). El modo U_3 no parece que represente ningún tipo de información en concreto.

Así mismo se observa que tanto el modo U_2 como el modo U_3 incluyen mucha información de la imagen, pero lo que interesa en este estudio es la zona intermareal, por tanto se propone dibujar únicamente los contornos iguales a cero.

En el caso del modo 2 esta decisión se toma ya que el lado tierra adquiere valores positivos y el lado mar negativo, por tanto el contorno igual a cero debería definir la línea de costa. En el caso del modo 3 se trata de intentar adquirir resultados más precisos y comprobar si detecta la línea de costa o hay algún tipo de tendencia con los otros dos modos.

B) Contorno de los modos U_2 y U_3 iguales a cero

Dibujando los contornos iguales a cero el resultado es el siguiente:

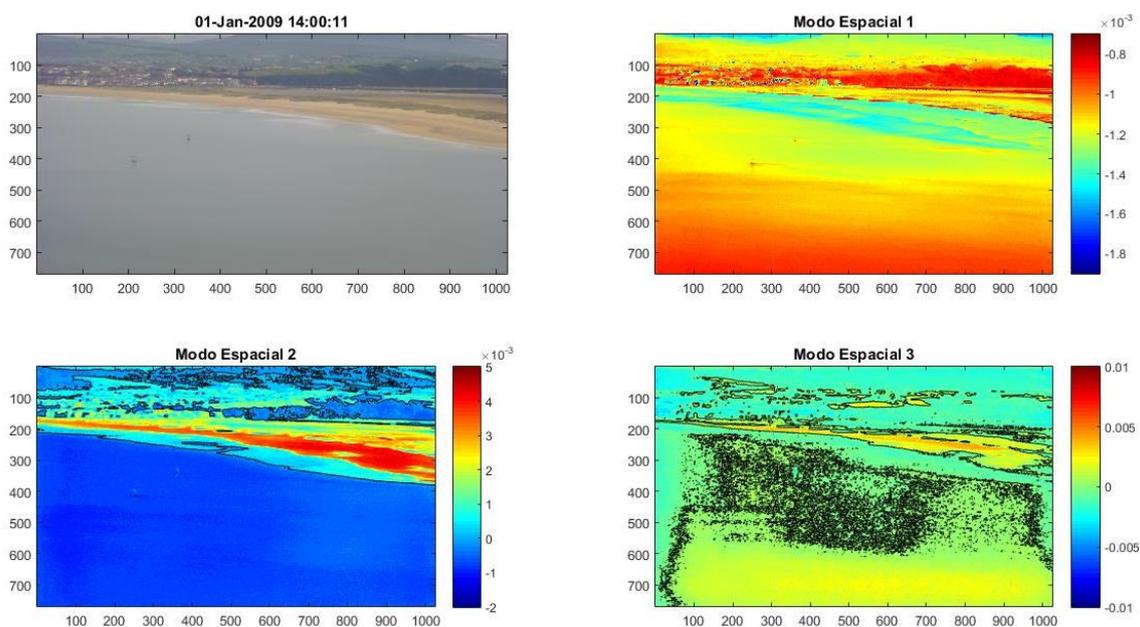


Figura 31. Modos espaciales con contorno igual a cero

Al dibujar los contornos iguales a cero de los modos espaciales dos (U_2) y tres (U_3) se observa que en el caso del modo espacial 2 la información queda recogida más uniformemente y detecta con relativa exactitud la línea de costa sin embargo también detecta otras estructuras.

En el caso del modo espacial tres se percibe una ligera mejoría pero no tan representativa como en el modo espacial dos y no parece que vaya a ayudar a detectar la línea de costa.

Se considera adecuado comprobar si el modo espacial 1 (U_1) puede mejorar la precisión en la detección que realiza el modo espacial 2, ya que distingue la parte estática de las imágenes Timex, por lo que debería delimitar la zona de playa seca que se puede considerar constante en un periodo de 10 minutos.

C) Representación de los modos en las imágenes

En las siguientes imágenes se muestra la representación del modo espacial dos y la suma del modo espacial uno y dos.

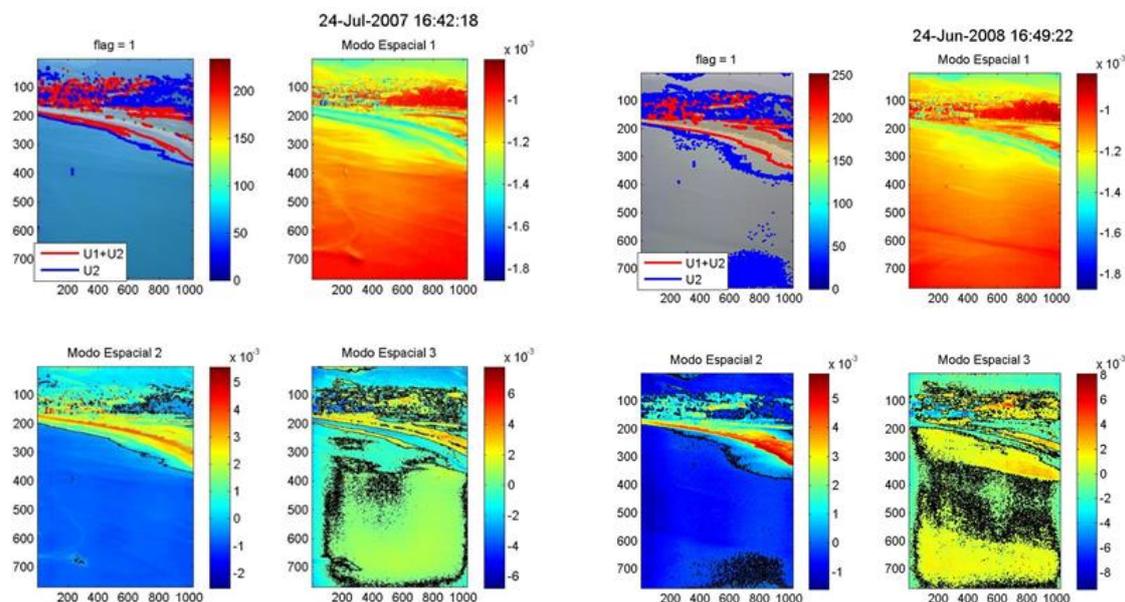


Figura 32. Modos en imágenes de El Puntal

Se comprueba una mejora de la detección de la línea de costa con la suma de los modos espaciales.

Así mismo se ve que hay información de ambos modos espaciales fuera de nuestra zona de interés, por lo que se ha optado por crear un polígono que defina el área de estudio con el objeto de aumentar la precisión en la detección.

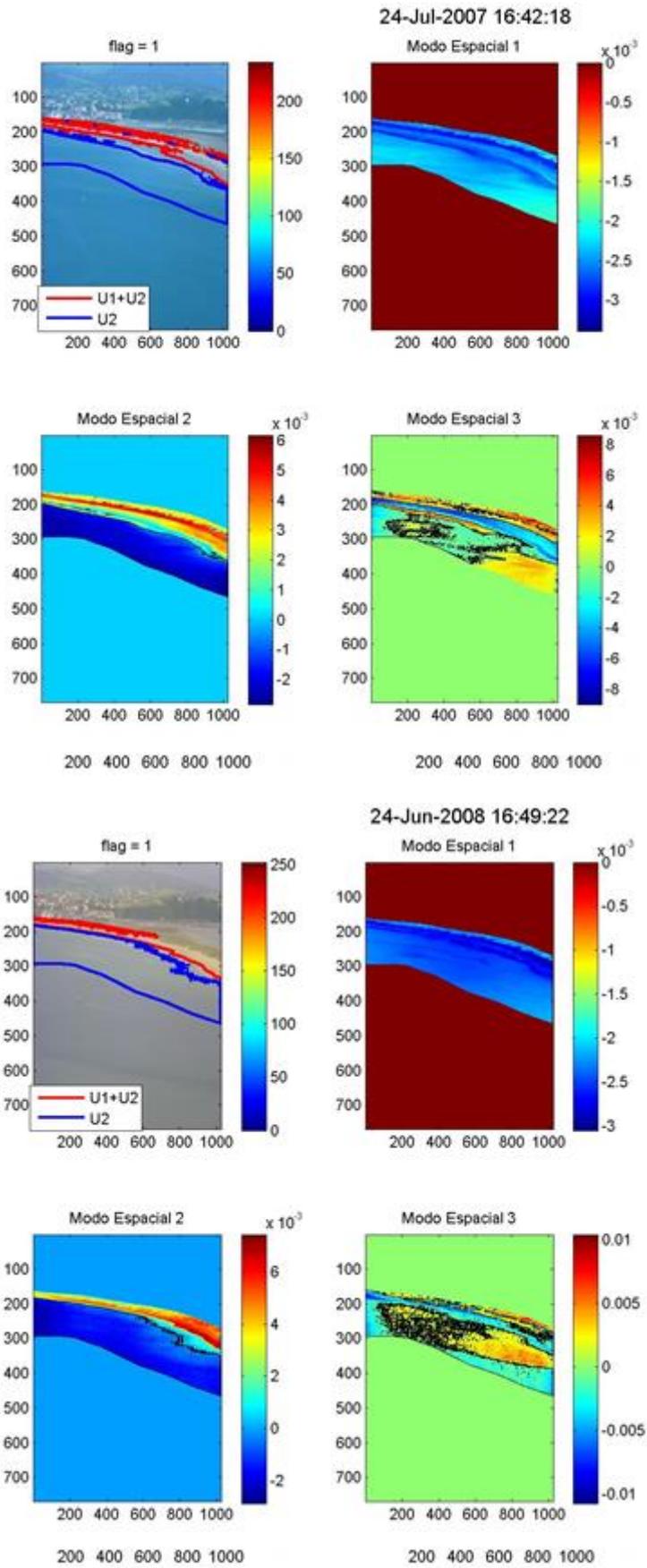
D) Modos espaciales dentro del área de actuación

Se ha definido un polígono que delimita el área de actuación que es de interés para el estudio, en este caso la zona intermareal. Se han escogido como límite superior la playa completa de El Puntal, y como límite inferior una zona de mar de forma que cubra la máxima bajamar, de esta forma el polígono se puede emplear para cualquier nivel de marea de El Puntal.

Para ello se ha creado una matriz del tamaño de la imagen con valores iguales a cero y se han empleado las funciones *ginput* e *inpolygon*. La primera permite introducir puntos a través del ratón del ordenador en la imagen y almacenar sus coordenadas x e y . La segunda función da valor de 1 a todos los píxeles que están dentro del polígono definido por la función *ginput*.

Una vez se tiene el polígono se pueden recalcular los modos espaciales pero está vez dentro del área de actuación definida.

Redibujando los modos que se encuentran dentro del polígono se llegaron a los siguientes resultados:



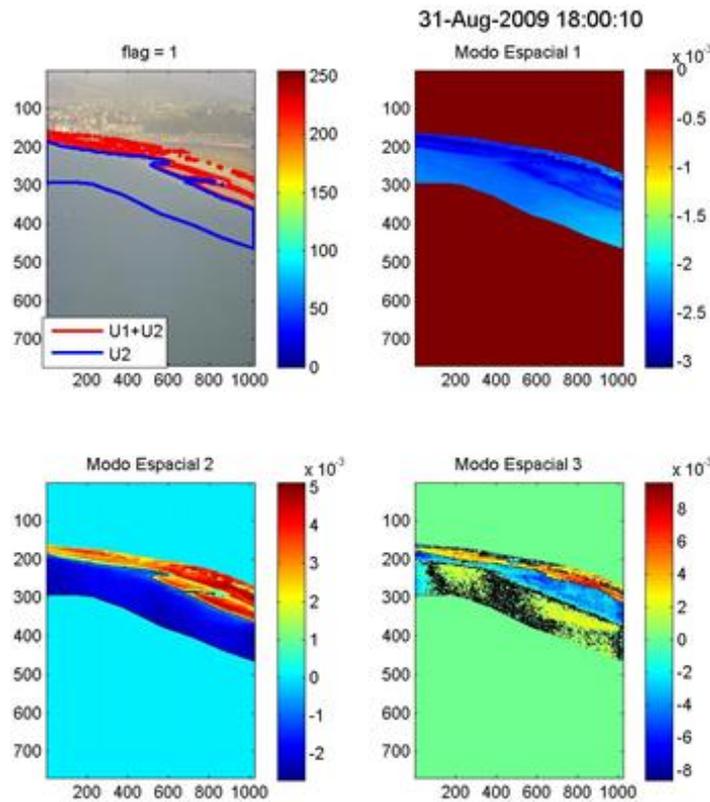


Figura 33. Modos espaciales en el polígono

Se observa una mejoría en la detección de la línea de costa, tanto en el modo U_2 como en la suma de los dos modos, ya que se elimina la información sobrante de la parte fija de la imagen.

Así mismo se verifica que la suma de modos da mejores resultados que el modo espacial dos únicamente. Se cuantificaron los resultados de las dos posibles opciones en 100 imágenes aleatorias del año 2008. Mediante la suma de los modos el 85 % de las líneas de costa quedaban bien definidas y el 17 % con el modo espacial 2.

Es importante mencionar que cuando el modo espacial 2 era válido la suma de los dos modos daba el mismo resultado, esto indica que en esos casos el modo espacial 1 no aporta gran cantidad de información y tampoco distorsiona los resultados, por tanto se define como metodología para detectar la línea de costa la suma de los modos espaciales.

El resto de resultados se adjuntan en el anexo 3.

3.4.1.1 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En vista de los resultados es concluyente que la suma de los modos U_1 y U_2 es una solución para la detección de la línea de costa, que funciona en un 85%, por lo que se considera adecuado crear un segundo nivel de aproximación que se estudiará en el apartado 3.4.5, siendo el primer nivel de aproximación la suma de los modos espaciales 1 y 2.

A pesar de que se ha comentado que el modo U_2 puede detectar la línea de costa, la suma del modo U_1 mejora su definición porque determina la parte estática y ayuda a corregir la variabilidad del modo espacial dos.

Se han realizado histogramas del modo espacial dos y de la suma de los modos espaciales 1 y 2 para justificar el porqué de esta mejora.

Un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Sirven para obtener una visión general de la distribución de los datos. En nuestro caso al representar los modos espaciales lo que se obtiene es la frecuencia de cada valor del modo.

Analizando los valores que dan los modos espaciales, en cuanto a signo, si se representa el histograma del modo espacial dos, debería dar una frecuencia elevada en valores positivos (parte de tierra) y una frecuencia elevada en la zona de valores negativos (zona de agua). En la zona intermedia no debería haber tanta frecuencia.

Si se realiza el histograma de la suma de los modos, como el modo uno es siempre negativo, se intuye que habrá un incremento en la frecuencia de valores negativos.

Se han representado los histogramas del modo espacial 2 y la suma de modos espaciales de dos imágenes. En la primera el modo espacial dos no detecta correctamente la línea de costa y la suma de modos si, en la última imagen tanto la suma de modos como el modo espacial dos detectan correctamente la línea de costa.

Se observa que cuando el modo espacial dos no detecta correctamente la línea de costa no separa claramente los valores de tierra y agua. Al sumar el modo espacial 1 se mejora esa separación, se pueden ver dos concentraciones de valores, unos positivos (tierra) y otros negativos (agua) y una franja en el cero o cerca del mismo con menor frecuencia de valores.

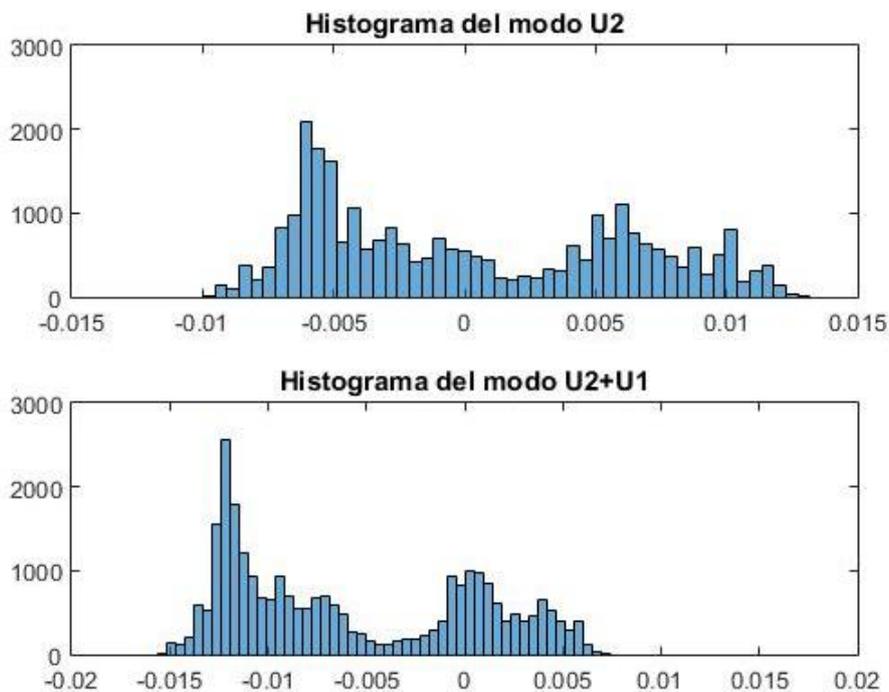
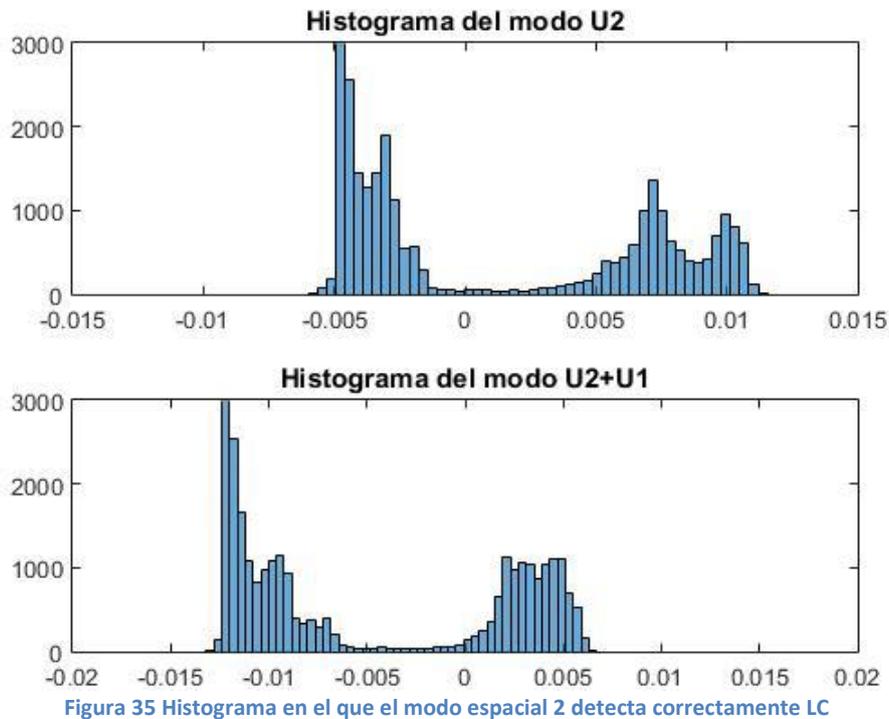


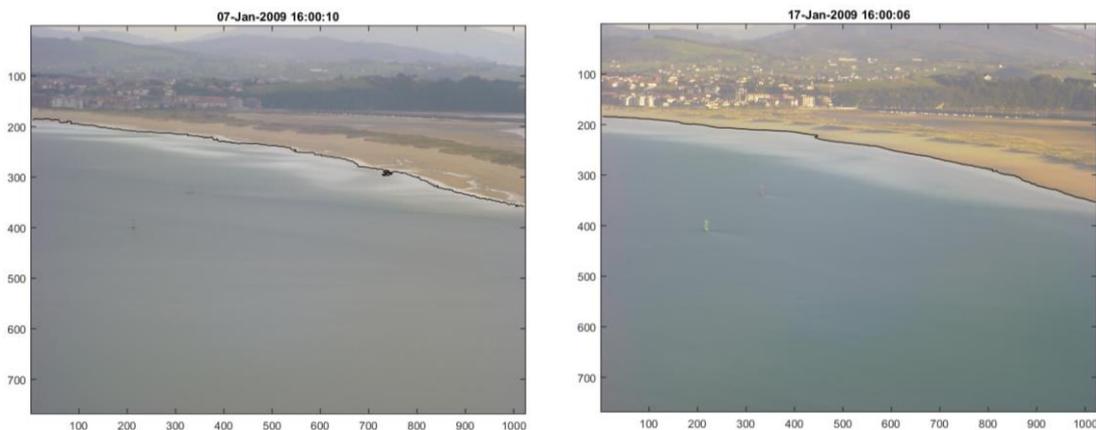
Figura 34. Histograma en el que el modo espacial dos no detecta correctamente LC

Cuando el modo espacial dos detecta correctamente la línea de costa, se distinguen las dos concentraciones de valores positivos y negativos y una concentración considerablemente menor en la zona del cero que se corresponde con el contorno de la línea de costa. En estos casos se comprueba que al sumar el modo espacial 1 no hay un cambio importante, se siguen distinguiendo las dos concentraciones de valores en los valores positivos y negativos y menor en la zona del cero.



3.4.1.2 RESULTADOS

Aplicando la suma de modos espaciales se obtuvieron los siguientes resultados gráficos:



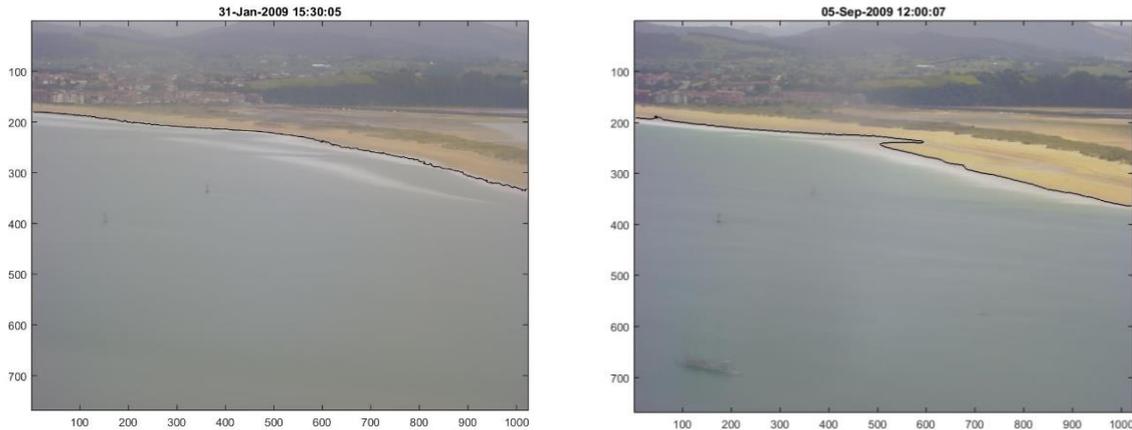


Figura 36. Línea de costa detectada con el primer nivel de aproximación

Se aprecia que la suma de los modos espaciales 1 y 2 dentro del polígono define adecuadamente la línea de costa

Se adjuntan el resto de resultados en el anexo 4

3.4.1.3 PORCENTAJE DE ACIERTO

Se aplicó la suma de modos espaciales a una serie de 829 imágenes de la playa El Puntal y la detección fue válida en un total de 529 imágenes, lo que supone un 63,8% de eficacia.

Para mejorar la eficacia se plantea crear un segundo nivel de aproximación introduciendo coeficientes ajustados empíricamente.

3.4.2 SEGUNDO NIVEL DE APROXIMACIÓN

El objetivo del segundo nivel de aproximación es mejorar los resultados obtenidos del primer nivel de aproximación en la detección de la línea de costa. Consiste en conseguir que cuando el primer nivel no sea válido, el segundo nivel detecte adecuadamente la línea de costa.

3.4.2.1 ESTUDIO DE POSIBILIDADES

Se han realizado cinco combinaciones lineales con coeficientes para mejorar los resultados. Las combinaciones son las siguientes:

- $LC = A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2$
- $LC = A_1 \cdot U_1 + U_2$
- $LC = U_1 + A_2 \cdot U_2$
- $LC = \beta \cdot U_2$
- $LC = C_1 \cdot U_2^{C_2}$

Para obtener los coeficientes se igualaron estas ecuaciones a las líneas de costa digitalizadas manualmente, el procedimiento para conseguir los coeficientes fue el siguiente:

- 1) Leer una imagen de la que se tenga la línea de costa digitalizada
- 2) Cargar la línea de costa digitalizada correspondiente a la imagen leída.
- 3) Calcular los modos espaciales de la imagen dentro de área de actuación como se ha desarrollado en apartados anteriores.
- 4) Calcular los coeficientes resolviendo el siguiente sistema matricial teniendo en cuenta que:

Los modos espaciales se definen en cada caso con la matriz U : $U = [U_1 \ U_2]$; $U = [U_2]$

La línea de costa digitalizada es LC

Los coeficientes se obtienen en la matriz A resolviendo el siguiente sistema

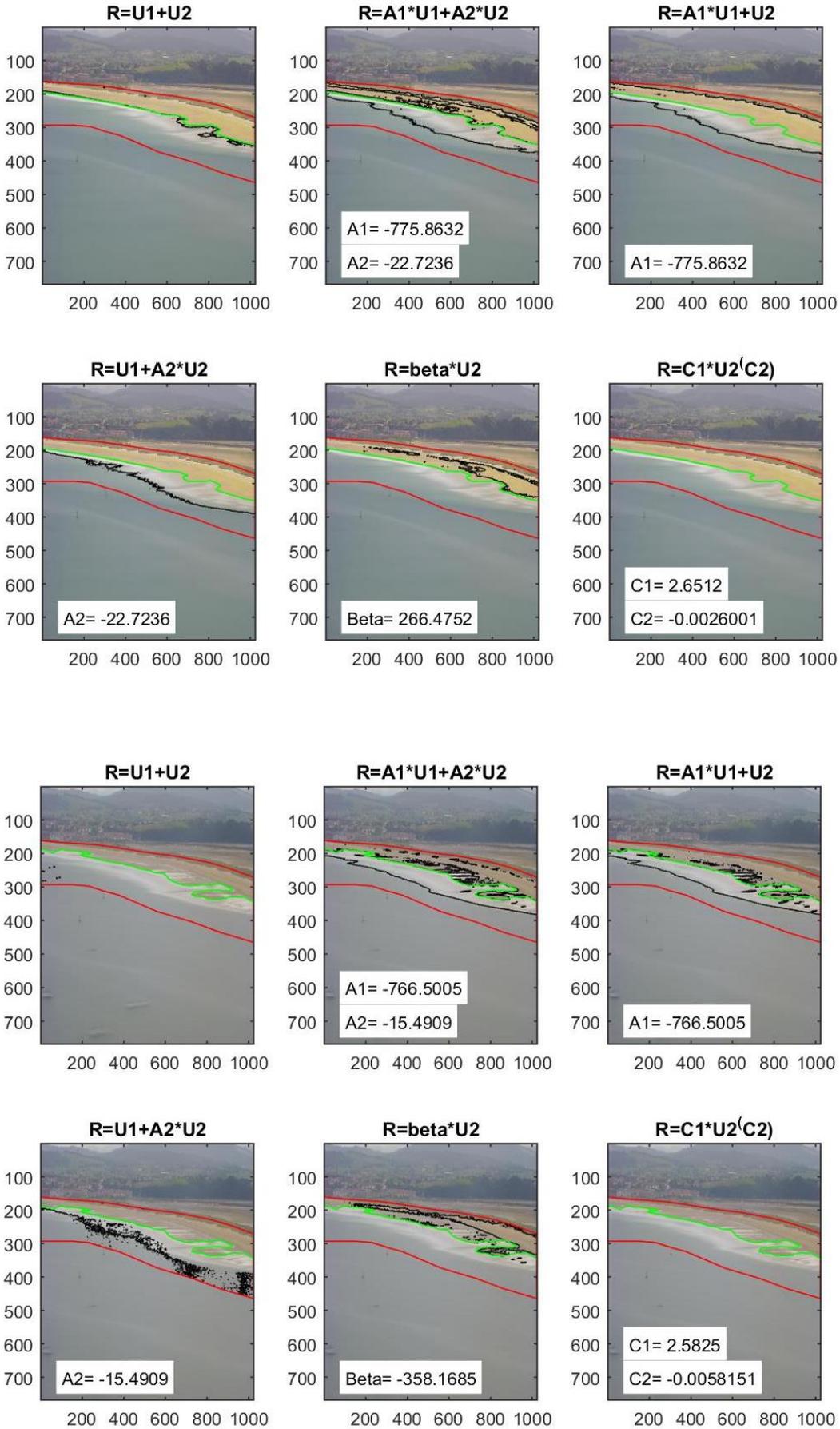
$$A = \text{inv}(U' * U) * U' * LC$$

Se representaron los contornos iguales a cero de las cinco posibilidades con el objeto de visualizar en una primera aproximación que combinación podía mejorar los resultados de la primera aproximación. En los gráficos se añaden también los valores de sus coeficientes.

En los gráficos se pueden distinguir tres tipos de líneas:

- Las líneas rojas representan el contorno del polígono de la zona de actuación.
- La línea verde es la línea de costa digitalizada.
- Las líneas negras representan los contornos iguales a cero de la matriz de la línea de costa de la metodología para cada posibilidad que se ha planteado.

Mediante los gráficos que se muestran a continuación se ha tratado de distinguir en una primera aproximación cuáles de las cinco posibilidades representaban mejor la línea de costa de forma automática.



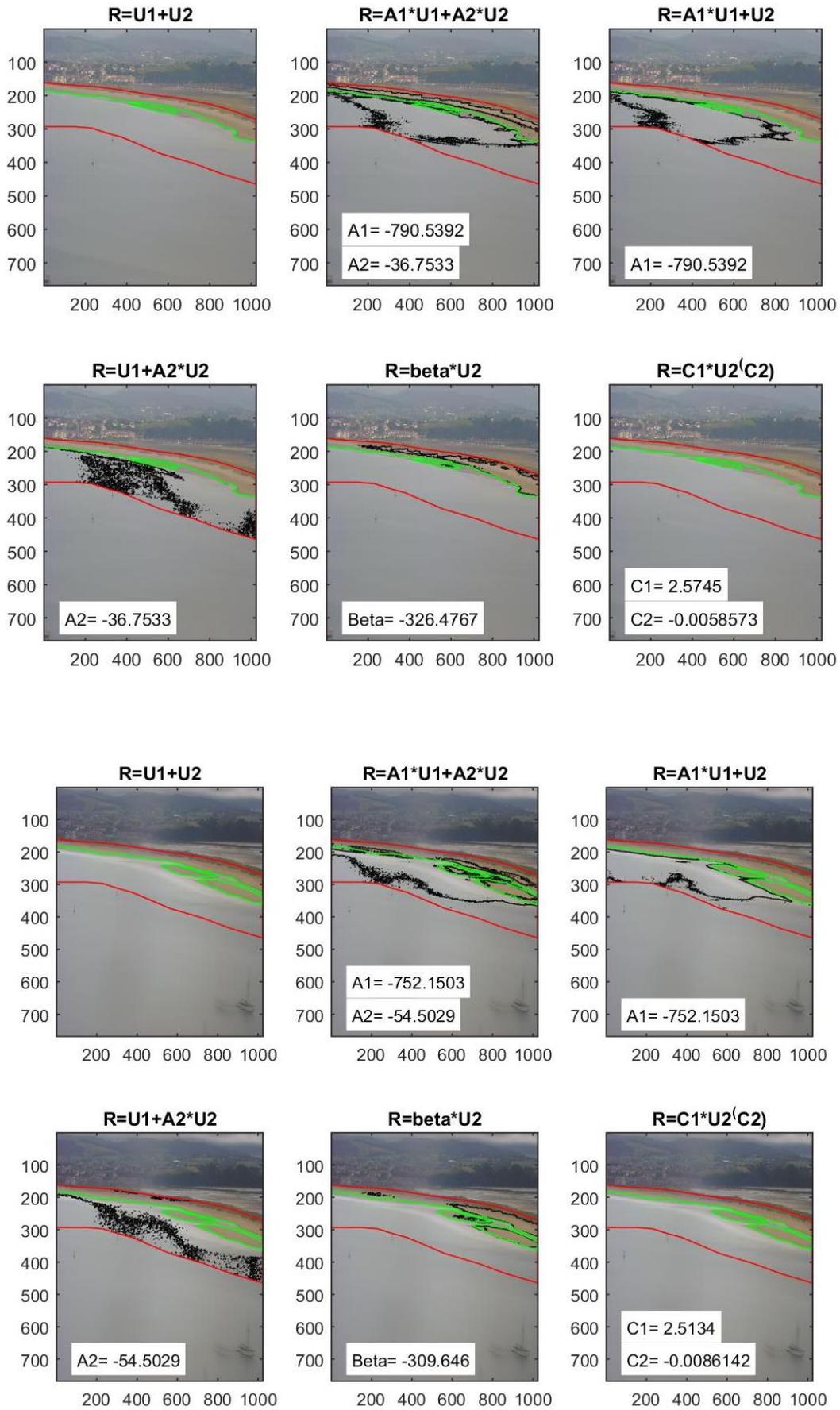


Figura 37. Estudio de posibilidades

Viendo los resultados gráficos se observa que las soluciones

- $LC = U_1 + A_2 \cdot U_2$
- $LC = \beta \cdot U_2$
- $LC = C_1 \cdot U_2^{C_2}$

No representan adecuadamente el contorno de la línea de costa ya que o no la definen o la detectan parcialmente o introducen ruido, por lo que se descartan.

Respecto a las dos posibles soluciones restantes, la decisión entre emplear un método u otro no es tan directo, por lo que se decidió realizar una estadística en 138 imágenes en las que se aplican las dos posibles metodologías para ver cuál adquiere mayor porcentaje de éxito.

Los resultados obtenidos fueron:

- 70 % para $LC = A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2$
- 40 % para $LC = A_1 \cdot U_1 + U_2$

Por tanto el segundo nivel de aproximación se realizara mediante el dibujo automático del contorno:

$$LC = A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2$$

A continuación se expone como se ha realizado el ajuste para que el modelo funciones automáticamente.

El resto de resultados se adjuntan en el anexo 5

3.4.2.2 AJUSTE A UN MODELO LINEAL

Una vez definido el método que mejor se ajusta para conseguir los máximos resultados posibles en la detección de la línea de costa, es necesario que los parámetros sean constantes o dependan de los modos U_1 y U_2 de forma que sea válido para cualquier imagen.

Como se ha visto en el estudio de posibilidades, para determinar los parámetros y ajustar el modelo son necesarias las líneas de costa digitalizadas, por lo que, en el caso de una estación nueva, este segundo nivel se podrá emplear cuando la estación lleve un cierto periodo operativa.

3.4.5.4.2 OBJETIVO

Definir los parámetros de ajuste A_1 y A_2 de tal forma que el modelo sea válido para la serie completa de imágenes, establecer a partir de qué momento se puede emplear este segundo nivel de aproximación y precisar en qué situación hay que aplicar este segundo nivel.

3.4.5.4.3 METODOLOGÍA

A) Actuaciones previas

Antes de definir la metodología para obtener los parámetros de ajuste, es necesario definir cuándo se da la situación para aplicar este segundo nivel. Para ello hay que saber cuándo el primer nivel no es eficaz y falla.

Se analizaron las medias y las medianas de los modos U_1 y U_2 tanto del lado mar como del lado tierra con el objeto de distinguir cuando la primera aproximación no era válida. Se observó que cuando la media del modo U_2 del lado agua de la imagen era menor que el valor medio de las medias, la primera aproximación no era válida.

Se ha definido el valor medio de las medias como $U_{crítico}$

Expresado matemáticamente:

$$U_{crítico} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{U_{2\text{ agua},i}}}{n}$$

$$\overline{U_{2\text{ agua},i}} < U_{crítico} \quad \text{No es válida la primera aproximación}$$

El valor $U_{crítico}$ es una constante, por tanto ahora es necesario establecer cuando este valor se hace constante y que valor adquiere.

Para establecer el $U_{crítico}$ se ha representado su evolución a medida que van aumentando el número de imágenes, en el eje de abscisas se representan el número de imágenes y en el de ordenadas el valor $U_{crítico}$. Para verificar que el resultado obtenido es fiable se realizó repetidas veces con la media de los modos de las imágenes ordenados aleatoriamente. El resultado fue el siguiente:

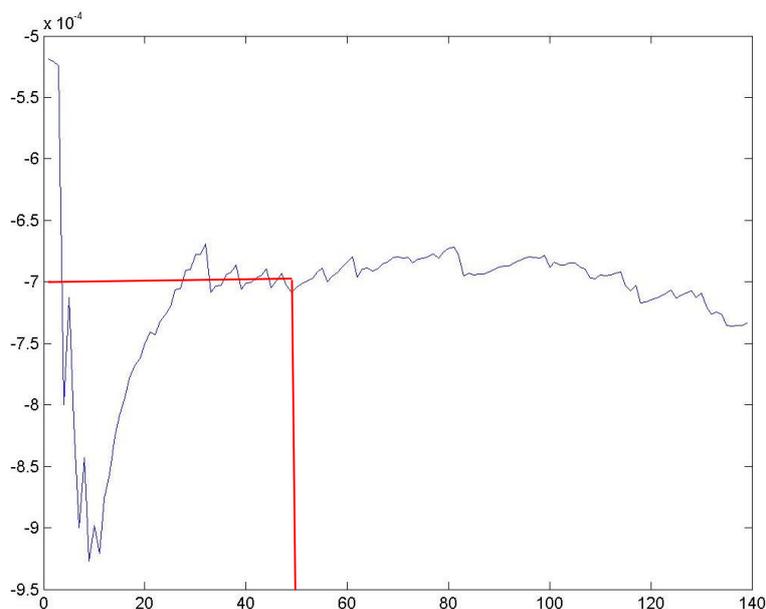


Figura 38. Representación de $U_{crítico}$ frente al número de imágenes

Se percibe que el valor de $U_{crítico}$, en este caso, tiende a adquirir un valor medio de $7 \cdot 10^{-4}$ a partir de las 50 imágenes.

El número de imágenes no es un valor fijo, sino que dependerá del momento a partir del cual se estabilice $U_{crítico}$.

B) Líneas de costa digitalizadas

Como se ha descrito anteriormente en el apartado de Estudio de Posibilidades, para ajustar el modelo son necesarias las líneas de costa digitalizadas a mano. El número mínimo de líneas de costa necesarias, es igual al número de imágenes hasta que se estabiliza el valor $U_{crítico}$. En este caso 50.

C) Resolución del sistema lineal

Se resuelve el sistema lineal para cada imagen con el fin de encontrar unos parámetros válidos para cualquier imagen. Por tanto

$$LC_i = A_{1i} \cdot U_{1i} + A_{2i} \cdot U_{2i}$$

Donde:

LC_i : Línea de costa digitalizada manualmente en cada imagen

A_{1i}, A_{2i} : Parámetros de cada imagen

U_{1i}, U_{2i} : Modos espaciales de cada imagen dentro del área de actuación

Se obtienen tantos parámetros como líneas de costa digitalizadas.

D) Determinación de parámetros de ajuste

Analizando los resultados se constató que el parámetro A_{1i} era prácticamente constante en todas las imágenes por lo que se definió el parámetro A_1 como:

$$A_1 = \frac{\sum A_{1i}}{i}$$

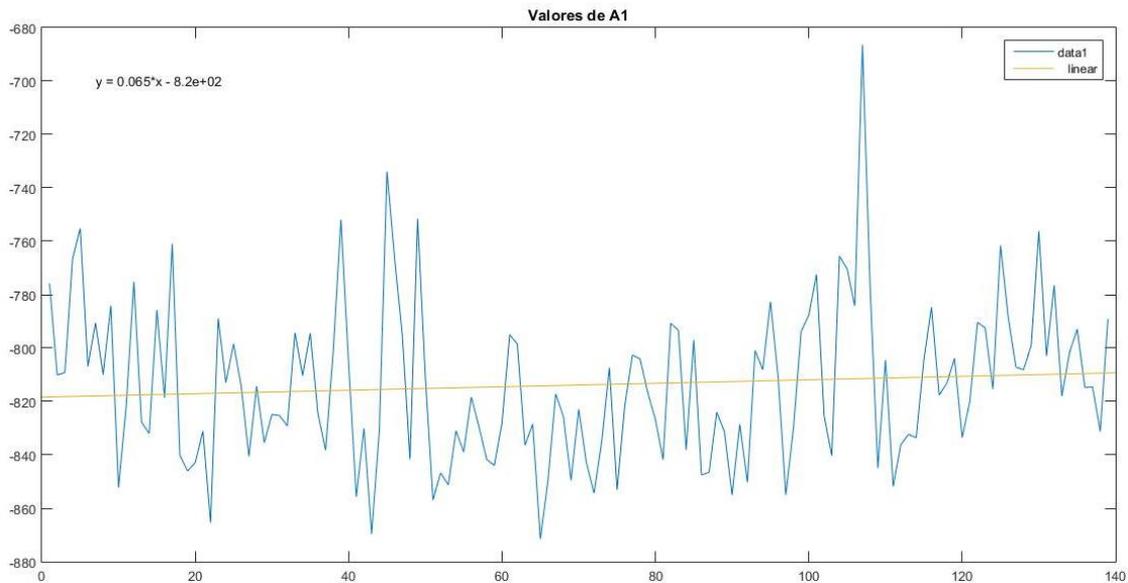


Figura 39. Valores del parámetro A1

Respecto al parámetro A_2 , este depende del modo U_2 y se comprobó que varía por una curva exponencial como se muestra en la figura

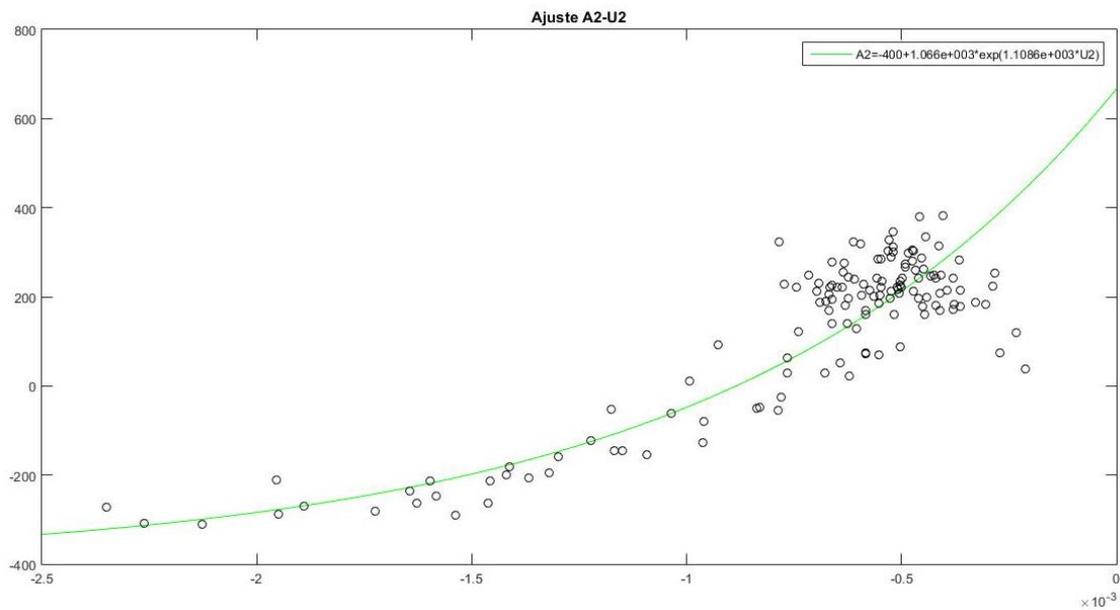


Figura 40. Representación A2-U2

Para obtener la expresión del parámetro A_2 hay que resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$A_{2i} = R_0 + R_1 \cdot e^{R_2 \cdot U_{2i}}$$

Donde:

A_{2i} : Es el parámetro A_2 de cada imagen

U_{2i} : Es el modo espacial dos de agua de cada imagen dentro del área de actuación

R_0 ; R_1 ; R_2 : Son las incógnitas a resolver

R_0 es el mínimo valor de los parámetros A_{2i} de todas las imágenes. Este valor surge porque la función no parte de cero.

Para determinar los coeficientes R_1 y R_2 se emplea el método de cuadrados mínimos.

3.4.2.3 RESULTADOS

Aplicando la metodología del segundo nivel de aproximación a un total de 193 imágenes, en las cuales había fallado el primer nivel de aproximación y que no fueron usadas para determinar el valor de los coeficientes R_0 ; R_1 ; R_2 , se determinó la línea de costa. Se encontró una eficacia del 95% que se corresponde con 184 imágenes válidas.

En las figuras siguientes se muestran algunos ejemplos de la línea de costa detectada en imágenes con línea de costa continua, línea de costa con barras, o con terrazas. En estos casos se muestra como la técnica es capaz de detectar la estructura emergida separada de la zona seca de playa, estructura emergida que todavía está unida a la zona de playa, y bordes continuos.

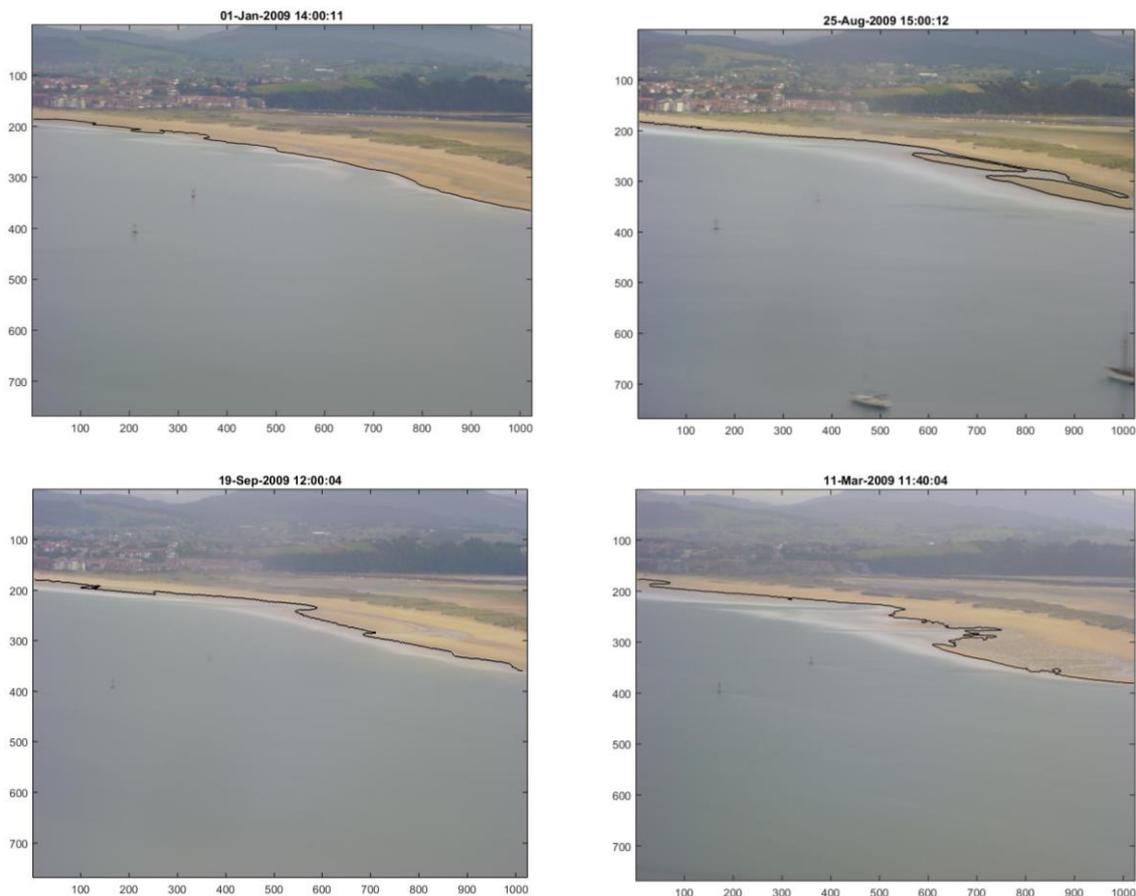


Figura 41. Línea de costa mediante el segundo nivel de aproximación

Algunos ejemplos más de los resultados se encuentran en el anexo 6

3.5 METODOLOGÍA

3.5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez que se ha encontrado un método para determinar la línea de costa se establece una metodología estándar para determinar la línea de costa a partir de imágenes. Esta metodología puede ser aplicada en dos situaciones:

- 1) In situ en una estación nueva a las imágenes que están siendo capturadas
- 2) Conjuntos de imágenes obtenidos previamente.

La metodología tiene dos niveles de aproximación:

- 1) Primer nivel de aproximación:

$$LC = U_{1,in} + U_{2,in}$$

- 2) Segundo nivel de aproximación:

$$LC = A_1 \cdot U_{1,in} + A_2 \cdot U_{2,in}$$

La línea de costa LC en ambos niveles de aproximación es el contorno igual a cero de la suma de los términos.

A continuación se describe la metodología:

- 1) Selección de imágenes:** Mediante la función *imread* se leen las imágenes que ya se han definido como válidas con el método explicado en el apartado 2.5.3
- 2) Determinación del área de la playa:** Como se ha descrito anteriormente, para aumentar la precisión de los resultados es recomendable definir un área de actuación. Para la delimitación del área es necesario crear un programa en Matlab que contenga las funciones *ginput* e *inpolygon*. La función *ginput* permite guardar las coordenadas de los puntos que definen el polígono y la función *inpolygon* da valor de uno a todos los píxeles que se encuentran en el interior de dicho polígono, de esta forma se podrán seleccionar posteriormente que parte de los modos se encuentran en el interior del polígono.
- 3) Cálculo de los modos espaciales U_1 y U_2 :** al igual que en apartados anteriores, una vez se ha leído la imagen ya la tenemos en forma matricial. A continuación se obtienen las matrices de los canales R, G y B y se transforman en forma de vector. Es necesario crear la matriz F que está compuesta por los tres vectores R, G, B. Una vez se tiene la matriz F se aplica la función *svd* que realiza la Descomposición en Valores Singulares obteniendo así las matrices U , S y V . La matriz U es tridimensional y para obtener los modos espaciales U_1 y U_2 simplemente hay que coger las dos primeras dimensiones de la matriz U . Expresándolo matricialmente:

$$U_1 = U(:, :, 1) \quad U_2 = U(:, :, 2)$$

- 4) Cálculo de los modos espaciales U_1 y U_2 dentro del polígono:** Una vez se han obtenido los modos, seleccionar los que se encuentran dentro del polígono es sencillo. Se

encuentran los valores del polígono que son iguales a 1 con la función *find* y se guardan en una variable por ejemplo se le puede llamar “*in*”. A continuación se localizan los valores de los modos situados dentro del polígono como se muestra a continuación:

$$U_{1,in} = U_1(in) \quad U_{2,in} = U_2(in)$$

- 5) **Determinar el número de imágenes que es necesario digitalizar:** Para ello se hace una media corrida de $U_{2,agua}$ hasta que este valor se establezca y obtengamos así el número de imágenes necesarias y el valor $U_{crítico}$.
 Hasta obtener el número de imágenes que hacen que el valor de $U_{crítico}$ se establezca se puede emplear el primer nivel de aproximación $LC = U_{1,in} + U_{2,in}$
- 6) **Digitalizar la línea de costa de las imágenes necesarias de forma aleatoria**
- 7) **Resolver el sistema de ecuaciones $LC_i = A_{1i} \cdot U_{1i} + A_{2i} \cdot U_{2i}$:** De esta forma se obtienen los parámetros A_1 y A_2 de cada imagen.
- 8) **Cálculo de los parámetros A_1 y A_2 válidos para cualquier imagen.**

8.1) El parámetro A_1 se obtiene como:

$$A_1 = \frac{\sum A_{1i}}{i}$$

8.2) El parámetro A_2 se obtiene resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones con las imágenes digitalizadas:

$$A_{2i} = R_0 + R_1 \cdot e^{R_2 \cdot U_{2i}}$$

Donde

R_0 ; R_1 ; R_2 : Son las incógnitas a resolver

R_0 es el mínimo valor de los parámetros A_{2i} de todas las imágenes. Este valor surge porque la función no parte de cero.

Para determinar los coeficientes R_1 y R_2 se emplea el método de cuadrados mínimos.

Una vez calculadas las incógnitas R_1 y R_2 ya se tienen todas las variables de las que depende A_2 y este parámetro se puede calcular para cualquier imagen como:

$$A_{2i} = R_0 + R_1 \cdot e^{R_2 \cdot U_{2i}}$$

9) **Cálculo de $\overline{U_{2,agua_i}}$**

9.1) Si $\overline{U_{2,agua_i}} > U_{crítico} \rightarrow LC = U_{1,in} + U_{2,in}$

9.2) Si $\overline{U_{2,agua_i}} < U_{crítico} \rightarrow LC = A_1 \cdot U_{1,in} + A_2 \cdot U_{2,in}$

- 10) **Dibujo de la suma de los modos dentro del polígono (LC):** Se dibuja la imagen de la playa con la función *imagesc* y con la función *hold on* se superpone el dibujo de la línea de costa. Para minimizar el posible ruido restante de la imagen se guarda el contorno de la línea de costa de valor 0 con la función *contourc* en una variable denominada LC_0 . Por último para dibujar el contorno de la línea de costa calculado es necesario emplear la función *plot* indicando las coordenadas x e y de la matriz LC_0

$$x = LC_0(1,:) ; y = LC_0(2,:)$$

3.6 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

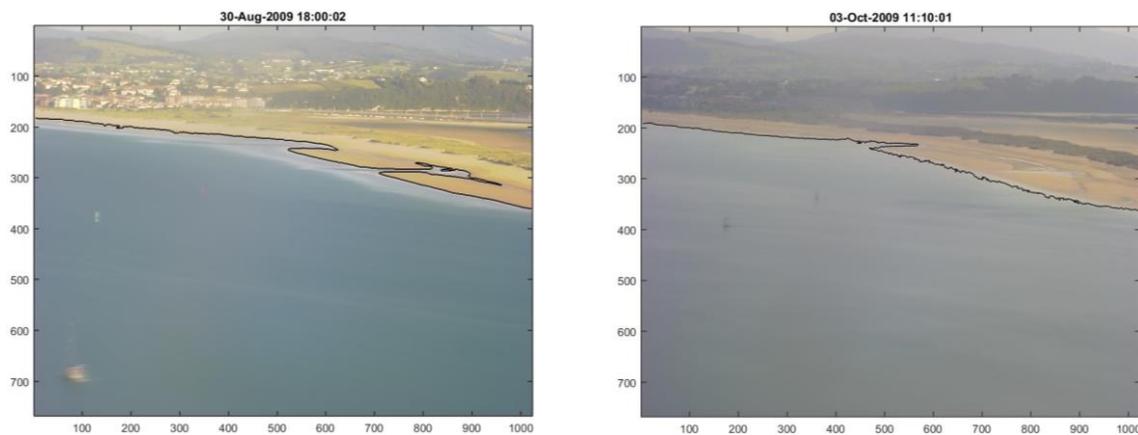
La metodología se ha aplicado a la playa El Puntal. Además de los porcentajes de validez o eficacia, se ha calculado la precisión del modelo midiendo la distancia desde la línea de costa digitalizada hasta la que genera el modelo.

3.6.1 PUNTAL

Se ha partido de 887 imágenes del año 2009 de la playa El Puntal. A estas imágenes se les ha aplicado la metodología del punto 2.5.3 para descartar las imágenes oscuras o de peor calidad, dando como resultado 829 imágenes adecuadas para aplicar la metodología con los dos niveles de aproximación.

Una vez aplicada la metodología, en 749 imágenes de las 829 imágenes, se detecta correctamente el contorno de la línea de costa, lo que supone un 90.3% de éxito.

Algunos ejemplos de la detección de la línea de costa después de aplicar la metodología se muestran a continuación:



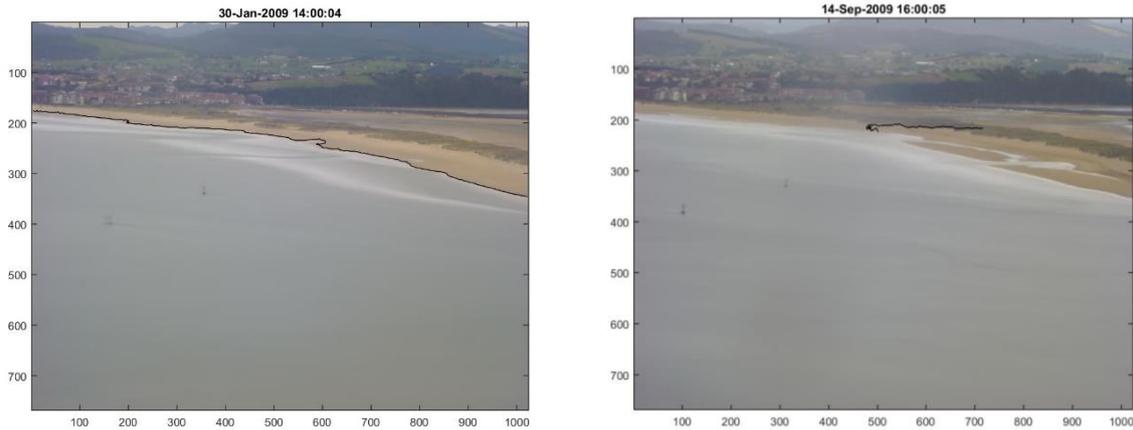


Figura 42. Resultados de la metodología en el Puntal

Se ha representado resultados correctos como incorrectos, pero se considera que la metodología funciona ya que se obtiene un 90.3% de éxito.

3.6.1.1 Precisión de la metodología

El objeto de este apartado es cuantificar numéricamente la exactitud del modelo mediante la distancia que hay entre la línea de costa digitalizada manualmente y la que define el modelo.

En este caso no es correcto hablar de error ya que como se mencionó en apartados anteriores la distancia se compara respecto a una línea que define el usuario, por lo que no es una línea concreta ya que si otro usuario define la línea de costa sobre la misma imagen, ambas líneas de costa serán distintas.

Para cuantificar la precisión se ha medido la distancia en 30 imágenes en pleamar al mismo nivel de marea. Se tomó la decisión de realizarlo en pleamar porque la línea de costa es continua y no hay posibles interferencias por la aparición de barras ya que es más costoso ser preciso al digitalizar la línea de costa cuando están surgiendo las barras o cuando ya han emergido. El resultado fue una precisión de -1.24 m.

En la figura se representa la línea de costa digitalizada de forma manual (línea azul) y la detectada aplicando la metodología (línea roja). Algunos resultados más se pueden ver en el anexo 7.



Figura 43. Precisión de la metodología

3.6.2 SARDINERO

En la playa del Sardinero localizada entre el Parque de Mesones y el parque de Piquío en Santander, cuenta con 2 cámaras capturando imágenes desde diversos puntos próximos a la playa cada 10 minutos. Estas cámaras fueron colocadas con la intención de contar personas, por lo que enfocan sobretudo la zona de playa seca desde un ángulo que no es de lo más adecuado para medir la posición de la línea de costa.

Aun así se decidió utilizar esta playa para probar la capacidad de la metodología que se ha comprobado que en la playa del Puntal da resultados satisfactorios.

Se analizaron un total de 62 imágenes aleatorias entre el año 2008 y 2011 a las que se les aplicó la metodología desarrollada para detectar la línea de costa.

La resolución de las cámaras es demasiado alta por lo que detecta a las personas que se encuentran en la playa, es capaz de distinguir zonas de la arena seca y húmeda y la línea de costa la define con múltiples puntos o tramos pequeños.



Figura 44. Detección de personas mediante la metodología

Las cámaras nos están situadas en el sitio idóneo para detectar la línea de costa. Se encuentran muy cerca por lo que se observa un cambio muy importante entre la pleamar y la bajamar por lo que el área de actuación es muy grande y se da mucha dispersión en los resultados.



Figura 45. Detección de dos líneas de costa por la metodología

A pesar de lo mencionado en estas imágenes, se dan otras situaciones en las que detecta bien la línea de costa, por lo que la metodología funciona, y hay que tener en cuenta la distancia, orientación y precisión de las cámaras.

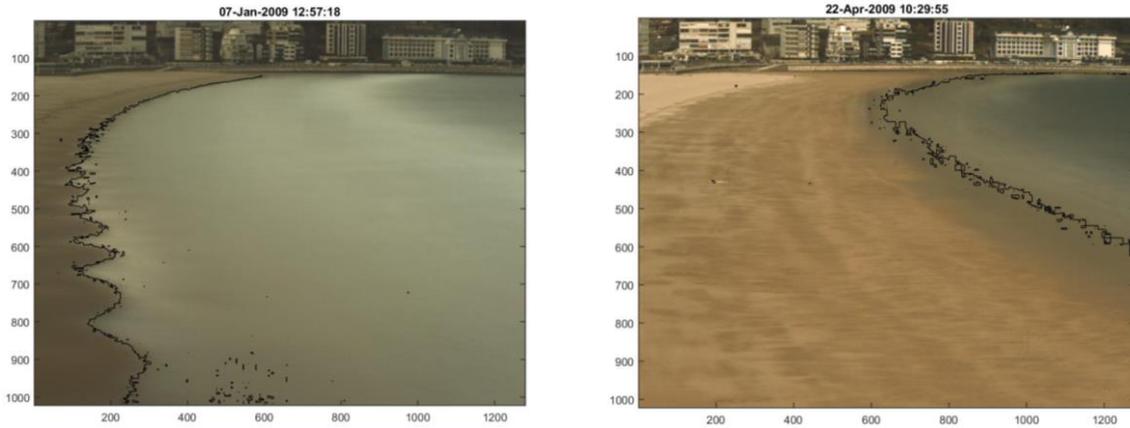


Figura 46. Resultados satisfactorios de la metodología en el Sardinero

Los fallos en la detección de la línea de costa se dan por la alta resolución de las imágenes, en aquellas donde se perciben muchas personas o en las que hay un gran ascenso. Se decide disminuir la resolución de las imágenes con el objeto de eliminar la detección de las personas. Además en vista de que el ascenso y descenso en las imágenes que se tienen del Sardinero es muy amplia se considera adecuado distinguir entre tres zonas de actuación para centrar los resultados en áreas de actuación más pequeñas:

- Marea alta
- Marea intermedia
- Marea baja

Los resultados mejoran considerablemente.

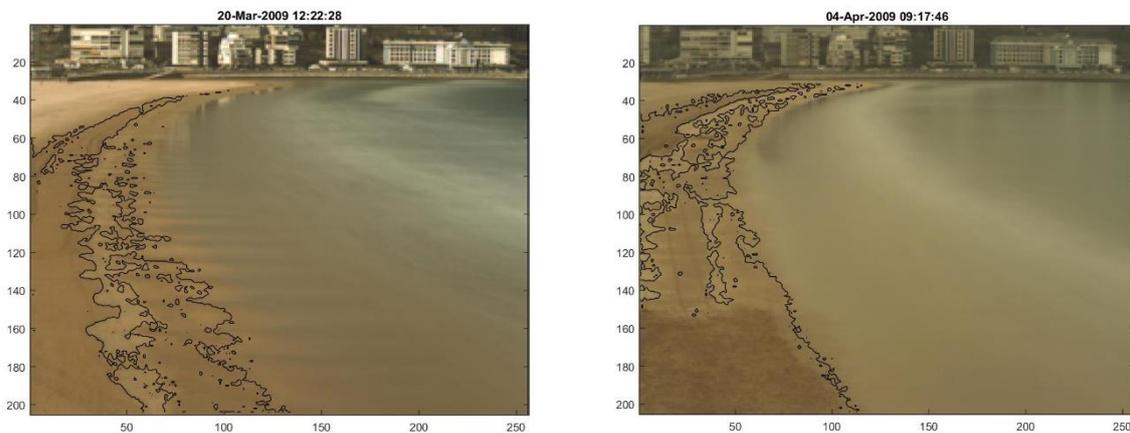


Figura 47. Resultados de la metodología con un 20% de resolución

En vista de que al disminuir la resolución y crear áreas de actuación menores los resultados mejoran, se considera que hay factores como la resolución de la cámara, su posición y la cercanía al objetivo que afectan a los resultados del modelo.

En el anexo 8 se encuentran más resultados gráficos de las imágenes del Sardinero

3.7 CONCLUSIONES

De acuerdo a diferentes resultados obtenidos de la metodología se llegan a las siguientes conclusiones:

- 1) Se desarrolló una metodología para detectar la línea de costa aplicando EOF
- 2) La línea de costa se obtiene al resolver la ecuación: $A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2$
- 3) Los coeficientes pueden ser $A_1 = A_2 = 1$ para una primera aproximación. En los casos en que la distribución de histogramas no está bien balanceada en la imagen entonces es necesario determinar los coeficientes A_1 y A_2 . Los valores de A_1 y A_2 se obtuvieron como:

$$A_1 = \frac{\sum A_{1i}}{i} \quad ; \quad A_2 = R_0 + R_1 \cdot e^{R_2 \cdot U_{2i}}$$

R_0 es el mínimo valor de los parámetros A_{2i} de todas las imágenes. Este valor surge porque la función no parte de cero.

Para determinar los coeficientes R_1 y R_2 se emplea el método de cuadrados mínimos

- 4) La metodología se validó en la playa El Puntal encontrando un porcentaje de líneas de costas detectadas de 90.3% y una precisión en la determinación de -1.24 m.

4. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y BARRAS INTERMAREALES DE LA PLAYA DEL PUNTAL

4.1 INTRODUCCIÓN

La playa El Puntal, se trata de una flecha arenosa que está situada en el municipio de Ribamontán al Mar, Cantabria. Posee una longitud aproximada de 3 Km y una anchura media de 120m. El crecimiento de esta zona se encuentra limitado por el canal de entrada y salida de la marea al interior de la bahía. Sobre esta flecha se encuentra la playa que lleva el mismo nombre, la cual es de las más importantes playas dentro de la bahía, debido a su doble funcionalidad; uso recreativo y protección del pueblo turístico de Somo.

Esta playa se caracteriza por pasar por los seis estados morfodinámicos que establecieron Wright and Short (1984) a lo largo del año, por lo que se puede observar la evolución de la costa y la formación y destrucción de barras en la misma.

Para mostrar las capacidades de la metodología desarrollada, esta se aplicara a las imágenes de la playa del puntal y se analizará el cambio de la línea de costa en términos de forma (imágenes del año 2009) y la evolución de las barras de arena localizadas cerca del extremo de la playa (imágenes del año 2003 en planta)

4.2 EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

El análisis de la evolución de la línea de costa puede ayudar a ver cuándo se forman las barras y en que épocas está la playa en cada estado morfodinámico. Además mediante ellas se puede conseguir definir la batimetría de la zona intermareal.

El objetivo de este apartado es visualizar la evolución de la línea de costa tanto mensualmente como anualmente.

4.2.1 ANÁLISIS MENSUAL

En apartados anteriores se ha comentado que conseguir datos manualmente de la línea de costa in situ es un proceso muy costoso, por ello se comenzaron a colocar cámaras en distintas playas para conseguir dichos datos procesando las imágenes digitales.

Hasta el momento los resultados obtenidos no han sido del todo satisfactorios, y mediante esta metodología se quiere demostrar que ahora es posible obtener los datos de evolución de la costa aplicándola a las imágenes digitales. Para ello se va a representar las líneas de costa de un mes, pero es importante decir que se puede realizar para cualquier periodo deseado ya que se

trata de una metodología automática que no tiene límite en lo que al periodo de tiempo se refiere.

El análisis mensual de la evolución de la línea de costa se trata de un estudio detallado que puede dar una idea de en qué momento la playa avanza, bascula, se generan barras o cambia de estado morfodinámico y consecuentemente estudiar los diferentes factores como altura de ola significativa, periodo o dirección del oleaje que hacen que cambie la morfología.

Se han empleado un total de 19 imágenes de junio del 2009, al mismo nivel de marea con una precisión de $\pm 15\text{cm}$.

Se han representado las líneas de costa, con un desfase vertical con el objetivo de poder visualizar correctamente las modificaciones que sufre la línea de costa en el tiempo. La zona que queda por debajo de la línea de costa es la parte de playa y la superior es la zona de mar.

El resultado es el siguiente y se analiza a continuación:

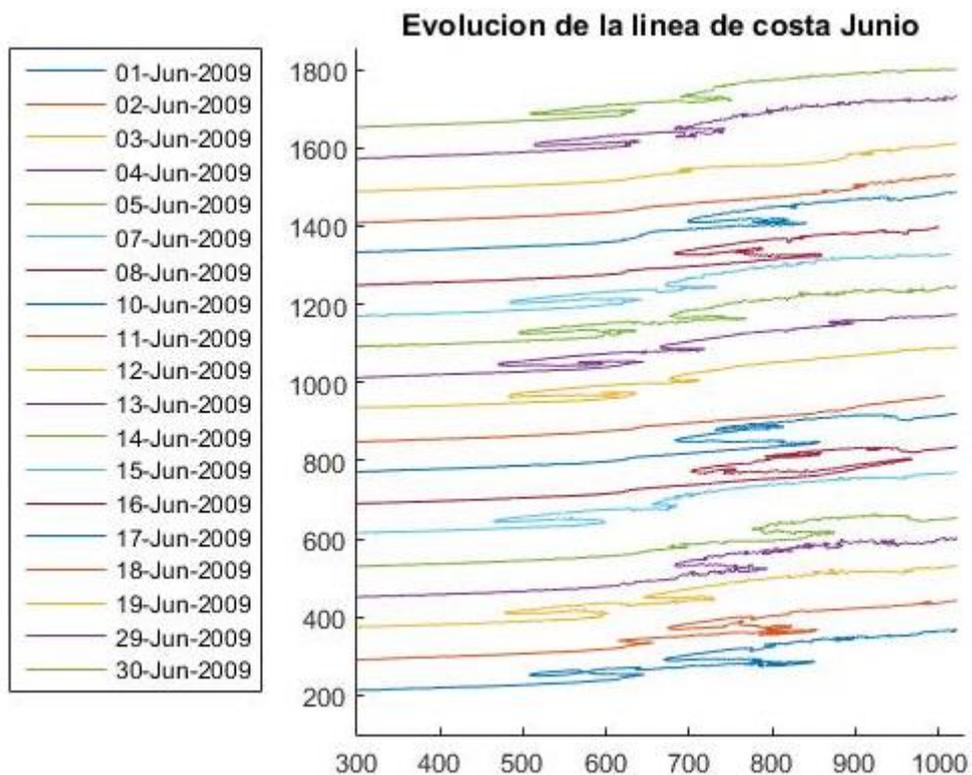


Figura 48. Evolución de la línea de costa en junio

Se observa que la metodología permite, además de detectar las líneas de costa, ver su evolución en el tiempo. En este caso en concreto se puede ver la evolución de las barras intermareales en el mes de junio.

Se detectan dos barras en la figura, una a la izquierda y otra a la derecha. La barra de la izquierda es más alargada y se observa que aumenta ligeramente su anchura. En el caso de la barra de la derecha se detecta un aumento en la anchura de la barra y una tendencia a acercarse a la otra barra.

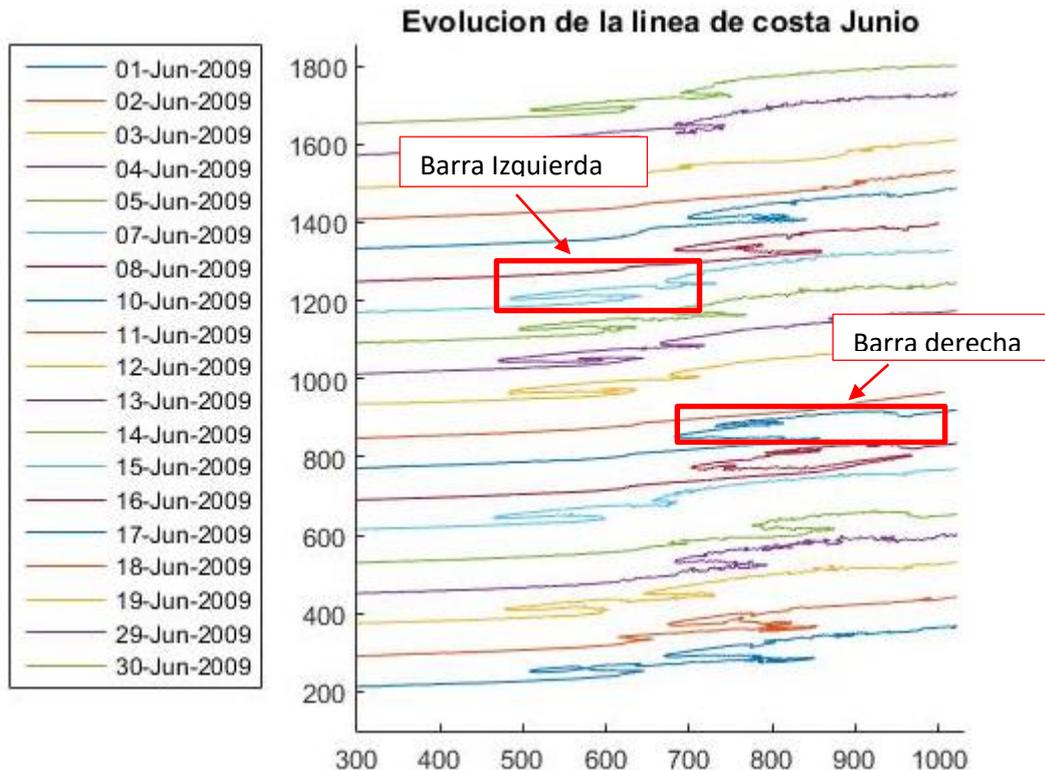


Figura 49. Detección de barras en la evolución de la línea de costa

Así mismo, aunque no se tengan datos numéricos de la cota de la línea de costa, se observa que la cota de las barras no puede ser muy elevada porque, por ejemplo, en la línea de costa del 10 de junio se detectan las barras, el 11 de junio no se pueden ver y el 12 de junio se visualizan de nuevo. Teniendo en cuenta que la diferencia de marea entre imágenes no es sustancial y que sólo ha pasado un día, la barra no ha podido ser destruida por tanto indica que su altura no es elevada.

La metodología permite visualizar la evolución de la línea de costa y de las estructuras intermareales de forma automática por lo que no es necesario tomar datos de campo, lo que supone un ahorro económico en lo que ha gestión de costas se refiere.

4.2.2 ANÁLISIS ANUAL

En el apartado anterior se ha visto cómo evoluciona la línea de costa en un periodo corto y que cambios se pueden detectar.

En este apartado se ha querido examinar la evolución estacional de la línea de costa, para ello se han representado 12 líneas de costa, una por cada mes, al mismo nivel de marea y aproximadamente el mismo día.

La metodología seguida ha sido la misma que para cada mes, y también se ha introducido un desfase vertical para visualizar correctamente los resultados.

Se observa que durante enero, febrero, noviembre y diciembre la línea de costa es una línea prácticamente constante que puede estar relacionado con un estado morfodinámico disipativo ya que la línea de costa es continua.

A partir del mes de marzo se observa que comienza la formación de las barras y que están van creciendo y desarrollando su morfología individual hasta el mes de junio.

A partir del mes de junio hasta octubre las barras van alargándose, acercándose entre ellas y se van aproximando a la costa hasta que en noviembre se adhieren a la zona de playa.

Durante los meses de marzo hasta octubre incluidos la playa se encuentra en estados morfodinámicos intermedios, pero no se pueden especificar mediante el gráfico representado.

Se observa que la evolución de la morfología de la línea de costa está condicionada por las barras.

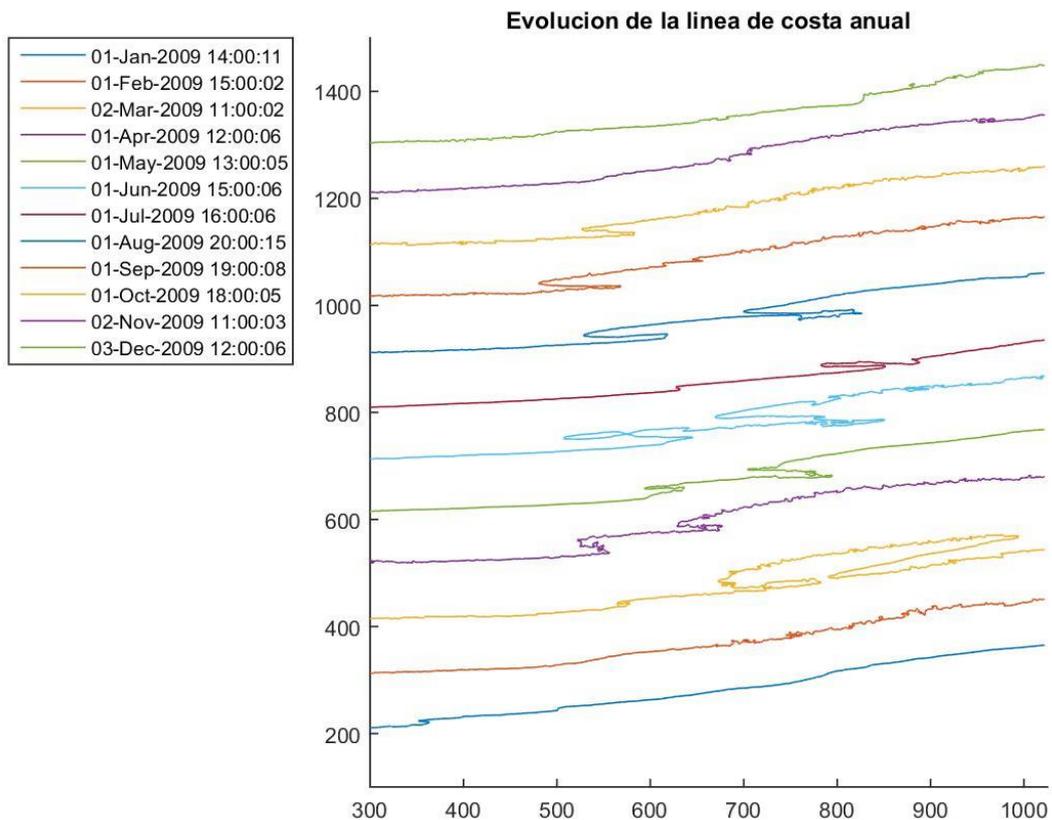


Figura 50. Evolución de la línea de costa anual

4.2.3 CONCLUSIONES

La metodología de detección de la línea de costa a partir de los modos espaciales ha permitido ver el desarrollo de la misma tanto mensual como anualmente. Al poder ver su evolución esta técnica permitiría dibujar la batimetría de la zona intermareal ya que cada línea de costa se corresponde a una cota.

Además puede generar un ahorro económico a las entidades públicas encargadas de la gestión de la costa ya que se trata de una técnica sencilla de implementar y aplicar que da unos resultados satisfactorios como se ha mostrado en puntos anteriores.

4.3 BARRAS INTERMAREALES

4.3.1 INTRODUCCIÓN

Otra de las capacidades de la metodología es que es capaz de detectar diferentes segmentos de línea de costa, por ejemplo las barras intermareales.

Se han seleccionado las imágenes de El Puntal del año 2003 entre los meses de mayo y septiembre. Estas imágenes se encontraban ya procesadas y son imágenes en planta de la playa completa de El Puntal. El nivel de marea de las imágenes corresponde a $-1\text{m} \pm 10\text{ cm}$.

Se ha mencionado que la playa pasa por todos los estados morfodinámicos a lo largo del año, pero las barras que se detectan en los meses seleccionados se encuentran en los estados intermedios, por tanto se va a estudiar la formación y evolución de las barras intermareales que se dan en dicho estado morfodinámico.

Se distinguen tres barras (izquierda, central y derecha), que emergen durante los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto.

Las tres barras que se han identificado son las siguientes:

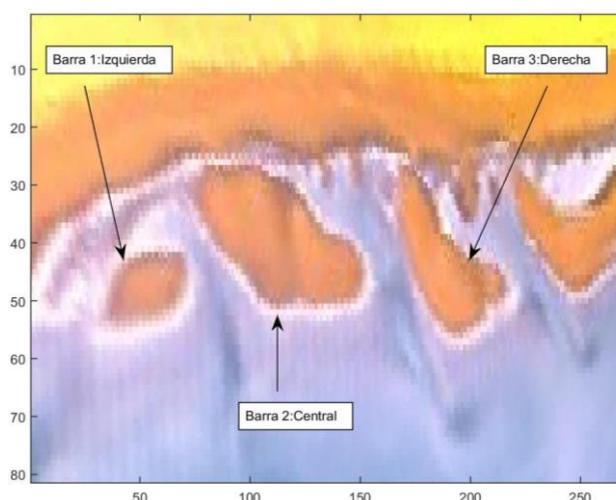


Figura 51. Localización de las barras intermareales de El Puntal

La evolución de las barras depende de las características del oleaje, como altura de ola y dirección del oleaje, por ello se han tomado el punto DOW de El Puntal.

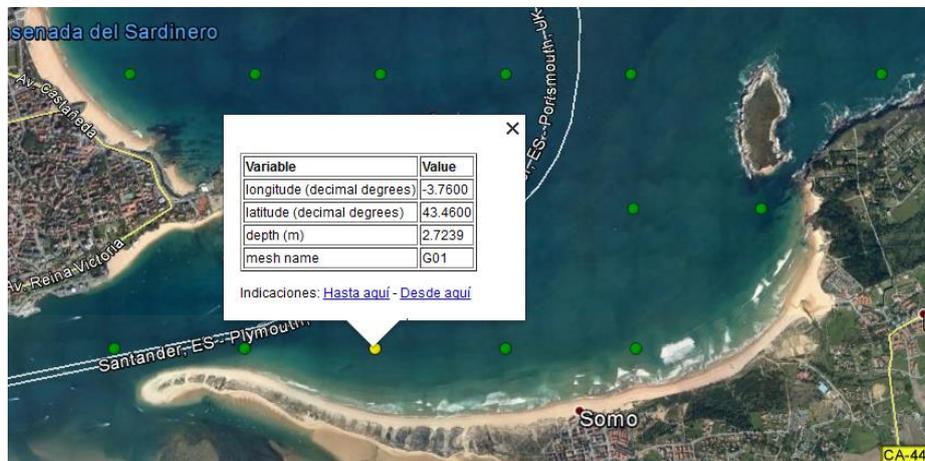


Figura 52. Localización del punto DOW

4.3.2 OBJETIVO

En este apartado se trata de estudiar la formación de las barras y su evolución tanto en tamaño y orientación y correlacionarlo con parámetros del oleaje como son la altura de ola significativa, dirección del oleaje o velocidad de caída de grano.

4.3.3 METODOLOGÍA

- 1) **Definición de las zonas de actuación:** se ha creado un polígono por barra donde se calcularán los modos
- 2) **Cálculo de los modos dentro del polígono**
- 3) **Definición del contorno de la barra a partir de los modos espaciales**
- 4) **Parametrización de las barras mediante una elipse:** Una vez se tiene el contorno de la barra mediante la función *fit_ellipse* de Matlab se obtiene el eje mayor, eje menor, orientación y posición de cada barra.
- 5) **Correlación con datos del oleaje:** Se han buscado correlaciones entre los datos del oleaje (altura de ola significativa y dirección del oleaje) y los parámetros de las elipses. Para obtener las correlaciones se han representado los siguientes gráficos:
 - Contorno obtenido mediante los modos y la elipse que parametriza la barra
 - Semiejes de la elipse respecto al tiempo
 - Orientación de la barra respecto al tiempo
 - Distancia de la barra a la línea de costa respecto al tiempo
 - Altura de ola significativa respecto a la distancia de la barra (en el tiempo)
 - Dirección del oleaje respecto a la orientación de la barra

Para realizar los gráficos se han promediado las alturas de ola, periodos y direcciones del oleaje durante 24 horas antes de la fecha de la imagen. Esta decisión se ha tomado porque el estado de una barra no se debe al oleaje de ese instante sino al previo.

4.3.4 RESULTADOS

Con los parámetros de la elipse que se han obtenido de la metodología se ha realizado los gráficos que se mencionan a continuación para cada una de las barras:

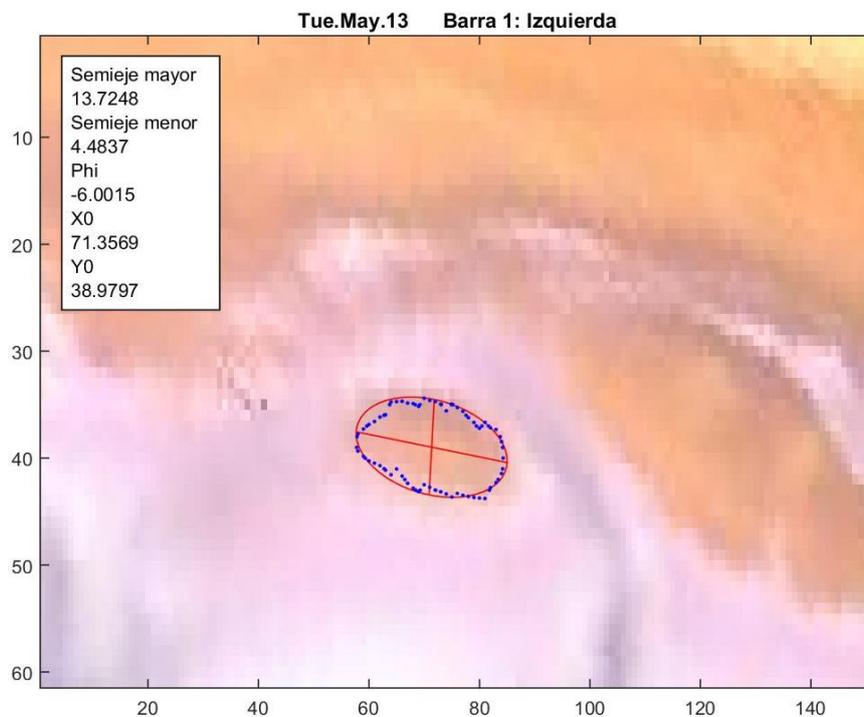
- A) Contorno obtenido mediante los modos y la elipse que parametriza la barra
- B) Semiejes de la elipse respecto al tiempo
- C) Orientación de la barra respecto al tiempo
- D) Distancia de la barra a la línea de costa respecto al tiempo
- E) Altura de ola significativa respecto a la distancia de la barra (en el tiempo)
- F) Dirección del oleaje respecto a la orientación de la barra

A) Contorno obtenido mediante los modos y la elipse que parametriza la barra

Barra 1:

En este caso la metodología ha detectado correctamente el 81% de contornos de la barra 1.

Se observa que el ajuste de las elipses se hace adecuadamente y la parametrización es correcta



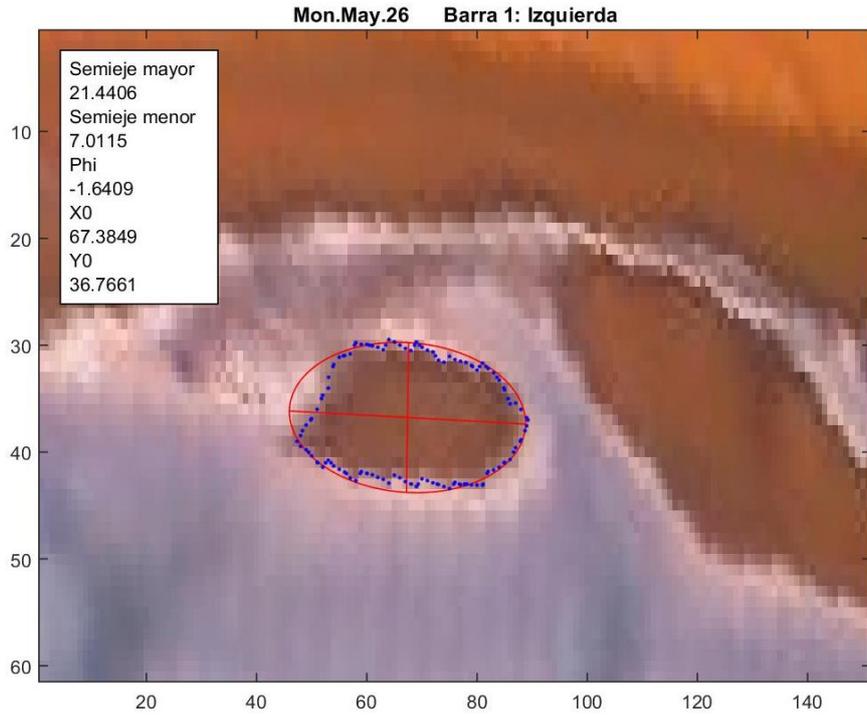
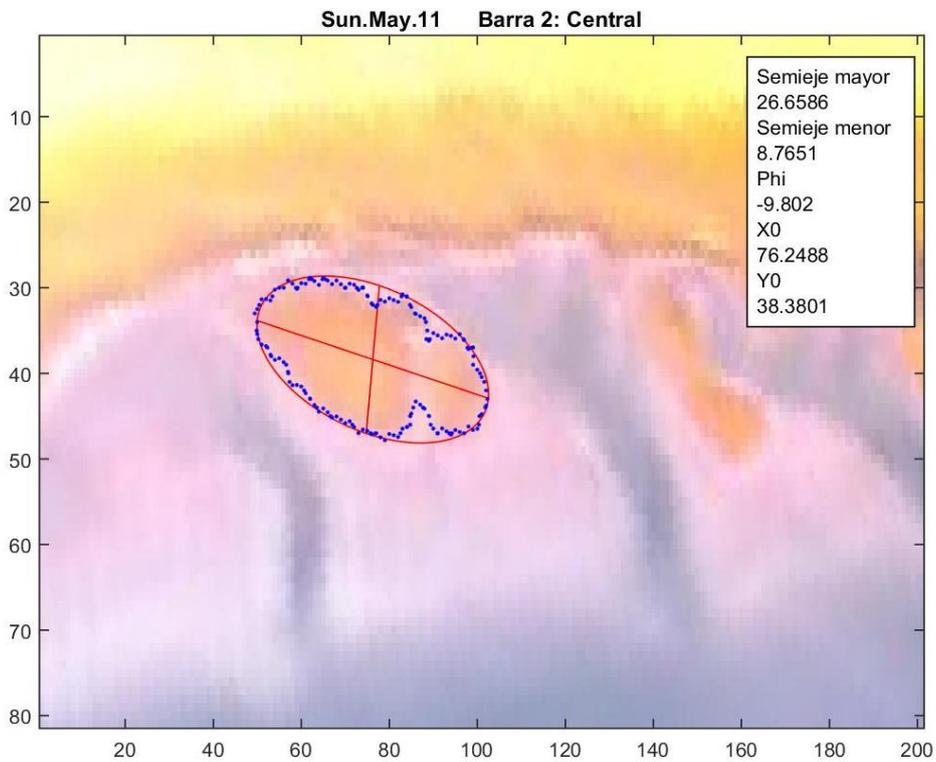


Figura 53. Detección de la Barra 1 mediante la metodología y elipse

Barra 2:

Se observa que al igual que con la barra 1, la barra 2 se detecta satisfactoriamente.



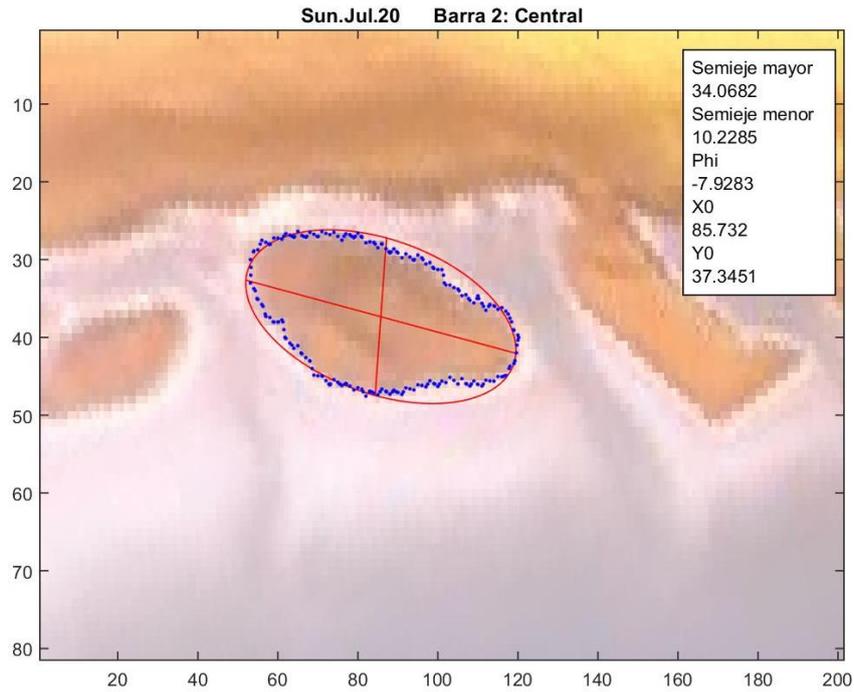
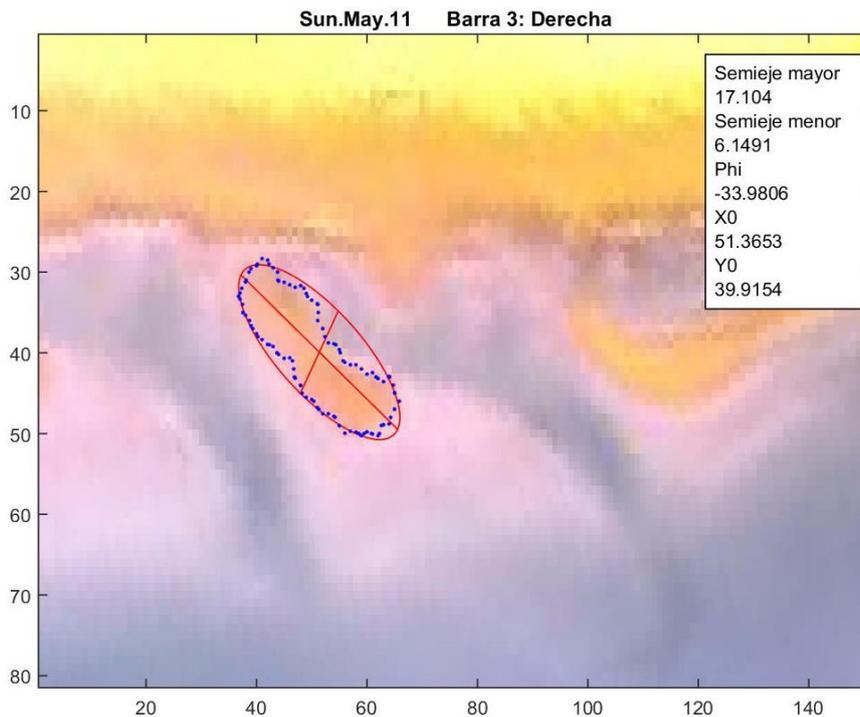


Figura 54. Detección de la Barra 2 mediante la metodología y elipse

Barra 3:

Se observa que la barra 3 se define adecuadamente mediante los modos, pero la parametrización mediante elipse no es conveniente ya que se trata de una barra con una tendencia rectangular y que gira adquiriendo una forma de media luna.

Por estos motivos se descarta esta barra para los siguientes análisis



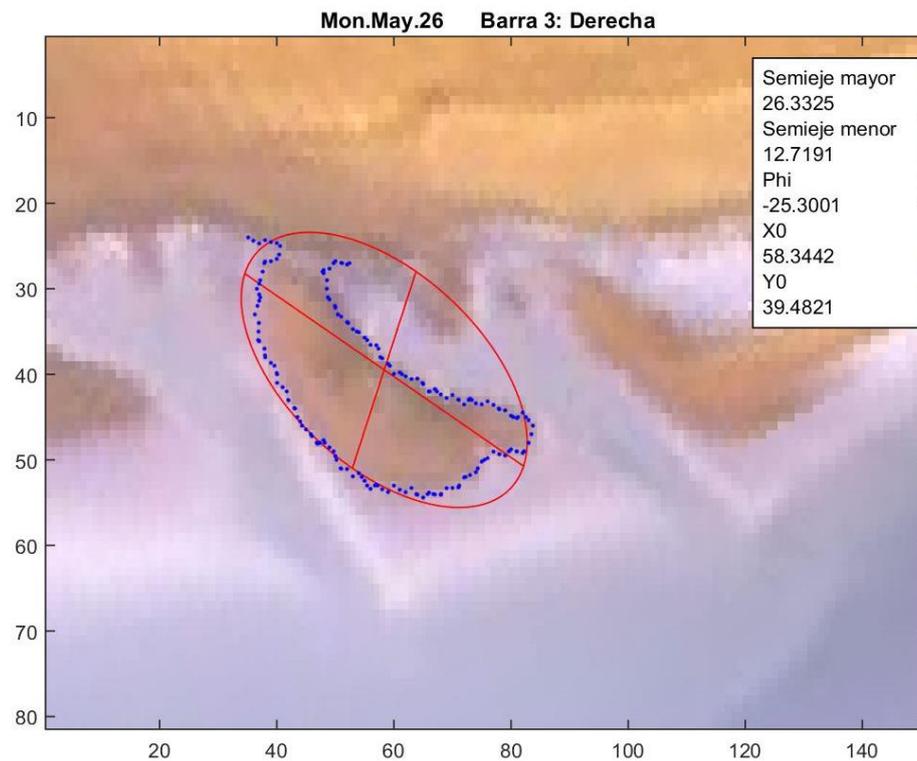
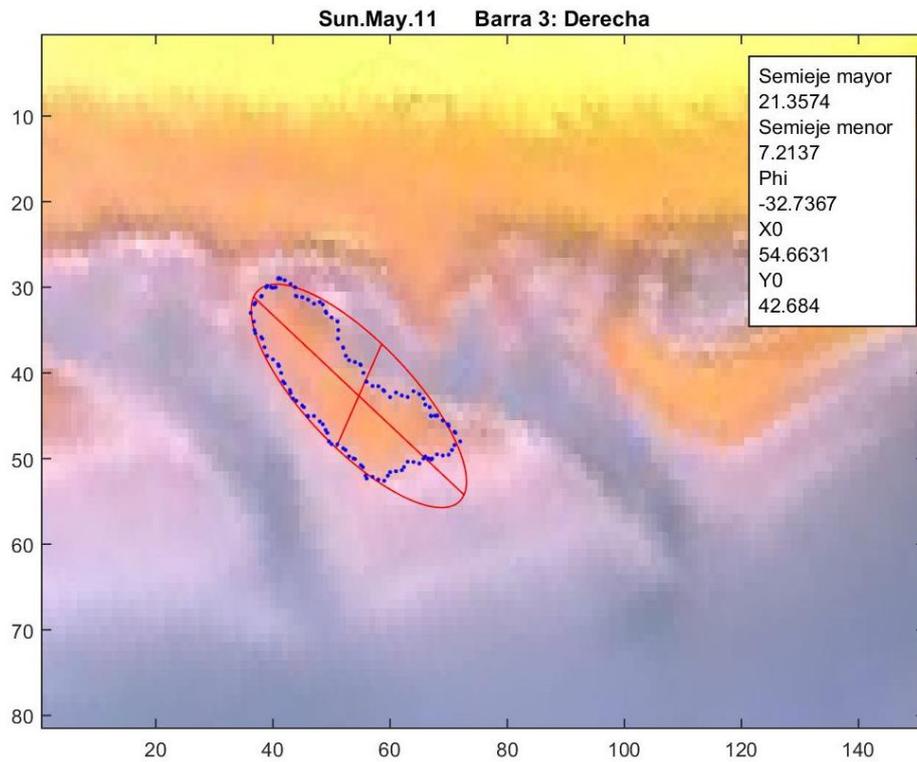


Figura 55. Detección de la Barra 3 mediante la metodología y elipse

En el anexo 9 se encuentran más ejemplos de la detección de las barras.

B) Semiejes de la elipse respecto al tiempo

Para visualizar la variación de los semiejes en tiempo se han realizado distintos gráficos. En el que se muestra a continuación se ha representado la barra 1 en dos fechas distintas con los valores que se obtiene de la parametrización en elipse.

Los parámetros de la elipse nos permiten ver cómo cambian las dimensiones de la barra. La barra de la izquierda es más pequeña que la de la derecha y así lo demuestran los valores de los semiejes.

En este caso la posición no es representativa ya que se ha introducido un desfase en el eje X para poder visualizar correctamente el gráfico.

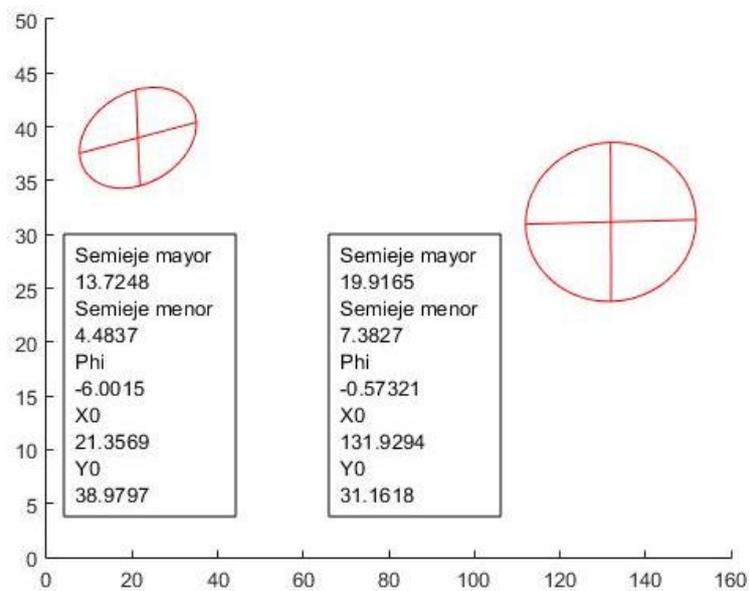


Figura 56. Representación de los resultados obtenidos mediante la parametrización de las barras

En los siguientes gráficos se ha representado la variación de los semiejes mayor y menor en el tiempo de cada barra.

Barra 1

- Semieje mayor:

Se observa una tendencia ascendente del semieje mayor de la barra en el tiempo. Así mismo se advierte que aunque la tendencia es ascendente, hay varios picos de distorsión. Estos picos se deben a la diferencia de marea entre las imágenes.

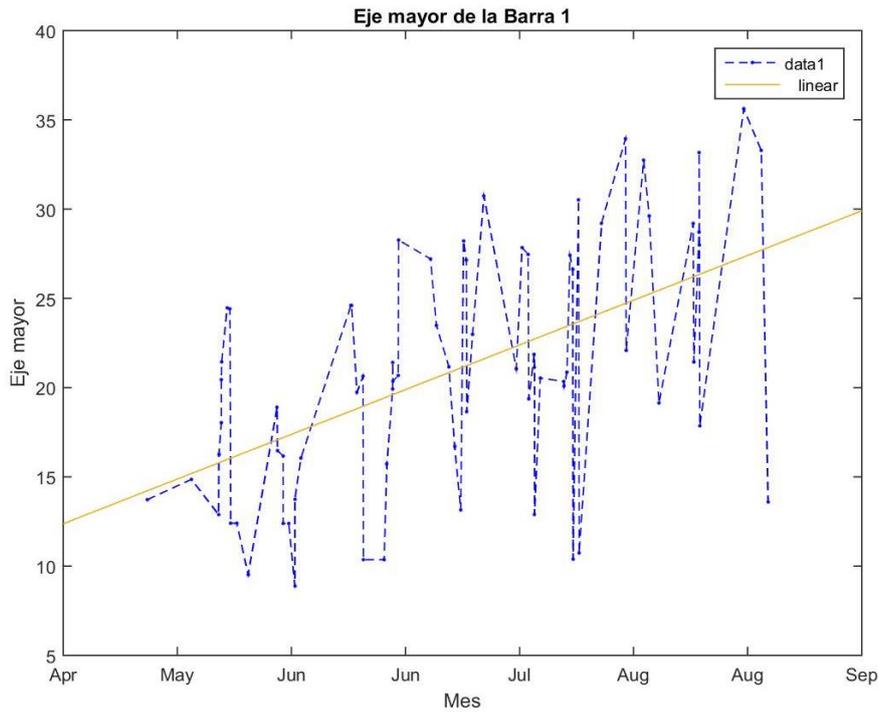


Figura 57. Variación del eje mayor de la barra 1 en el tiempo

Otra forma de representarlo es como se ve en la siguiente figura. En esta imagen se representa la tendencia ascendente mostrando dos barras por mes. Se comprueba que el semieje mayor aumenta linealmente hasta agosto.

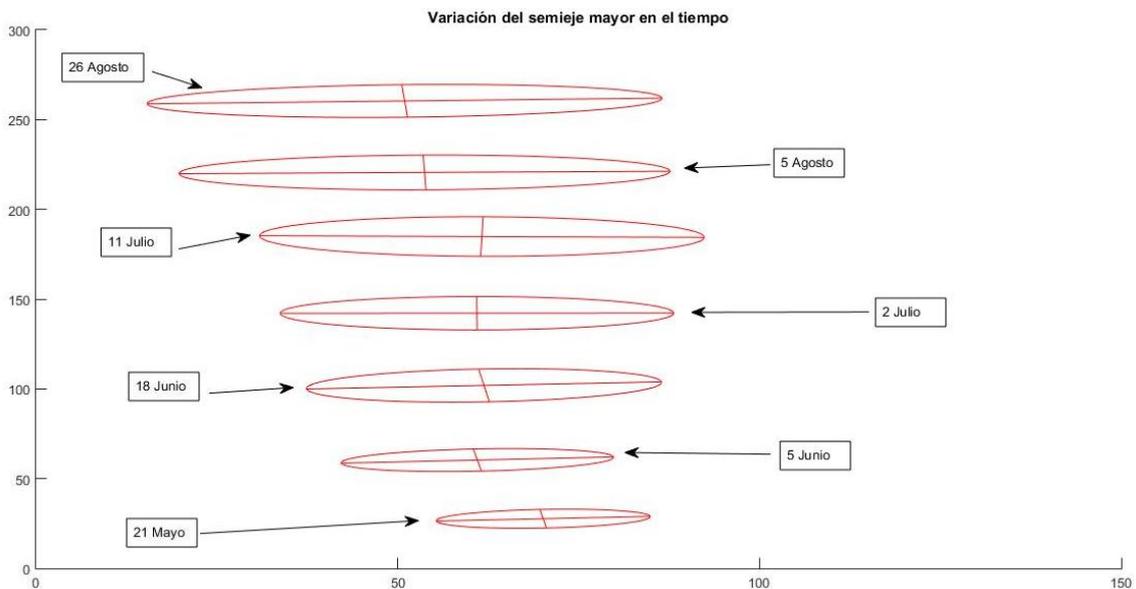


Figura 58. Representación del semieje mayor de la barra 1 en el tiempo

- Semieje menor

En este caso se observa un periodo en que el eje menor aumenta, se estabiliza o incluso disminuye.

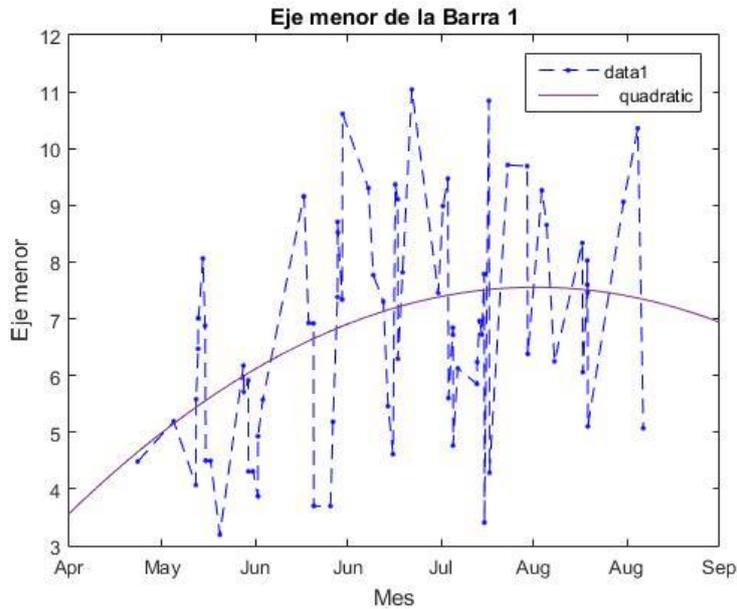


Figura 59. Variación del semieje menor de la barra 1 en el tiempo

Barra 2

- Semieje mayor:

Al igual que con la barra 1, el semieje mayor adquiere una tendencia ascendente, pero la pendiente no es tan pronunciada como en el caso de la barra 1

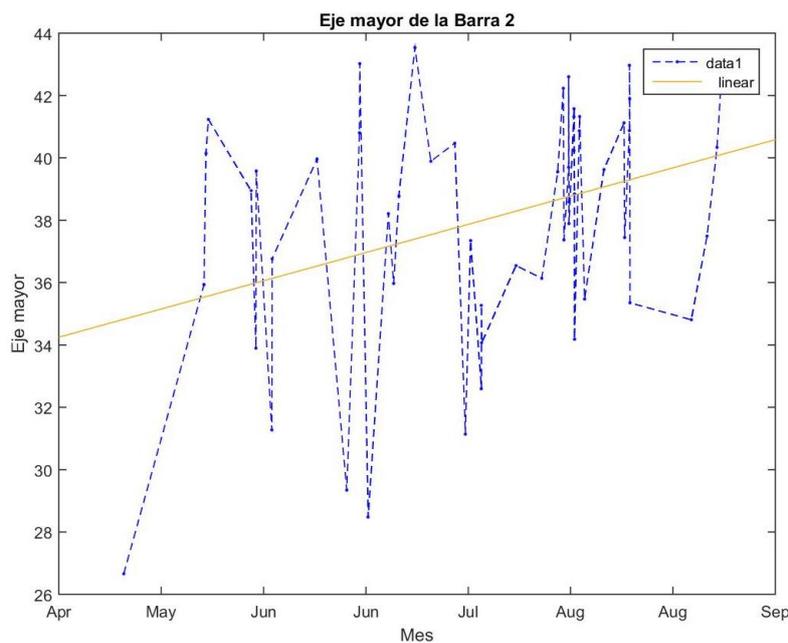


Figura 60. Variación del semieje mayor de la barra 2 en el tiempo

Así mismo se han representado varias barras parametrizadas para ver de una forma más simple la evolución del semieje mayor.

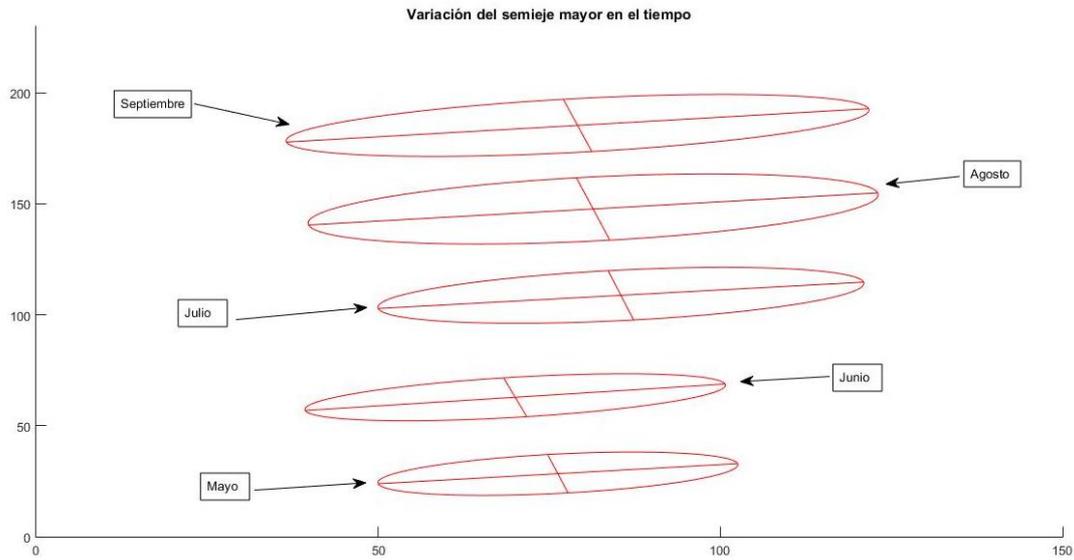


Figura 61. Representación del semieje mayor de la barra 2 en el tiempo

- Semieje menor:

En la tendencia del semieje menor de la barra 2 se visualizan dos segmentos, primero aumenta y luego disminuye.

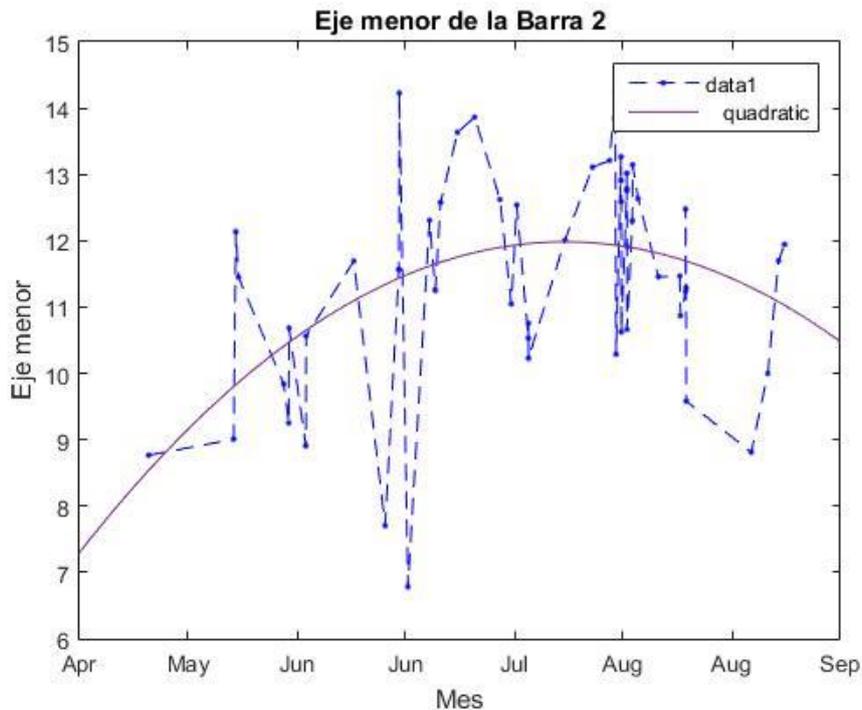
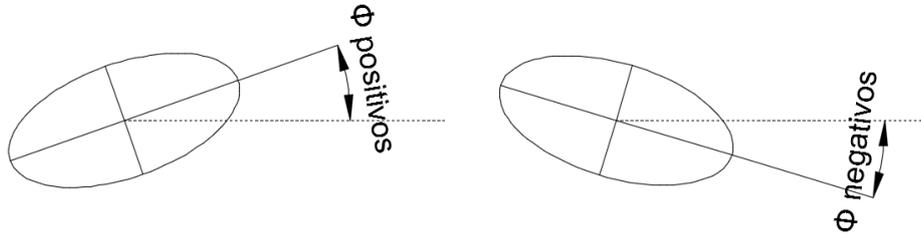


Figura 62. Variación del semieje menor de la barra 2 en el tiempo

C) Orientación de la barra respecto al tiempo

La orientación de la barra se mide respecto el eje horizontal con el semieje mayor de la barra. Se consideran ángulos positivos a los antihorarios.



Barra 1

Se observa que la barra 1 tiende a posicionarse paralela a la línea de costa adquiriendo valores en torno a 0°. Pasado agosto tiende a girar y adquirir valores negativos.

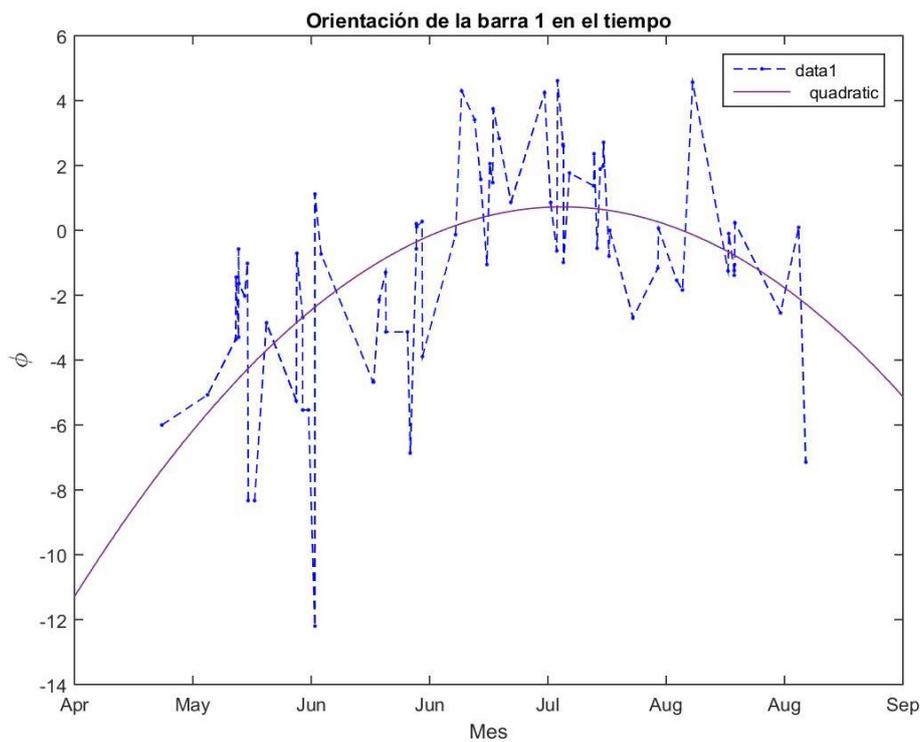


Figura 63. Variación de la orientación de la barra 1 en el tiempo

Barra 2

En el caso de la barra 2, siempre posee valores negativos, es decir, está girada respecto a la horizontal en sentido horario, aunque también tiende a colocarse horizontal pero más paulatinamente.

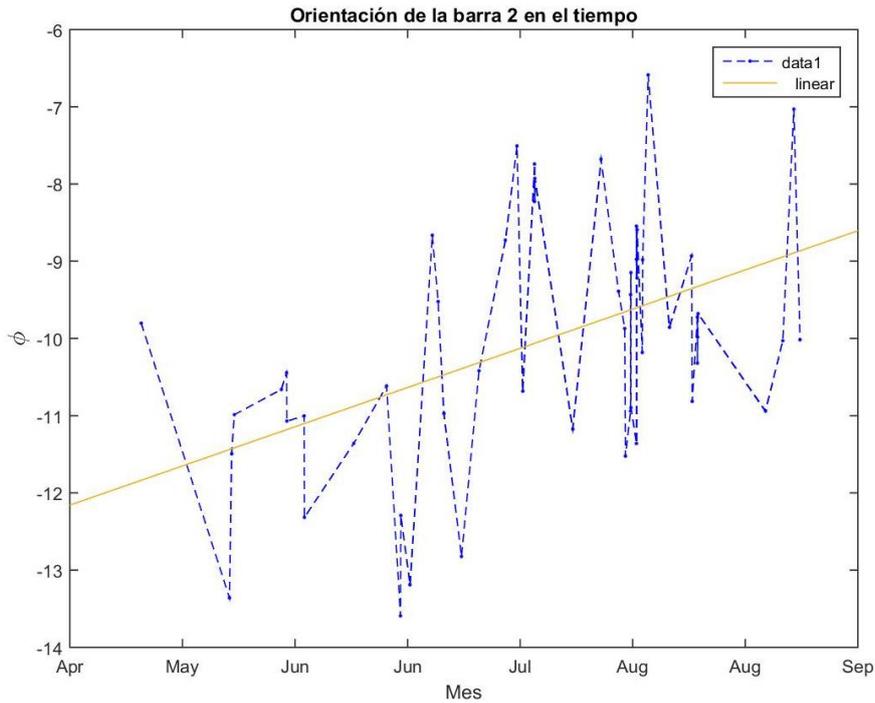


Figura 64. Variación de la orientación de la barra 2 en el tiempo

D) Distancia de la barra a la línea de costa respecto al tiempo

Barra 1

Se aprecia una tendencia descendente en la distancia, es decir, las barras tienden a acercarse a la playa.

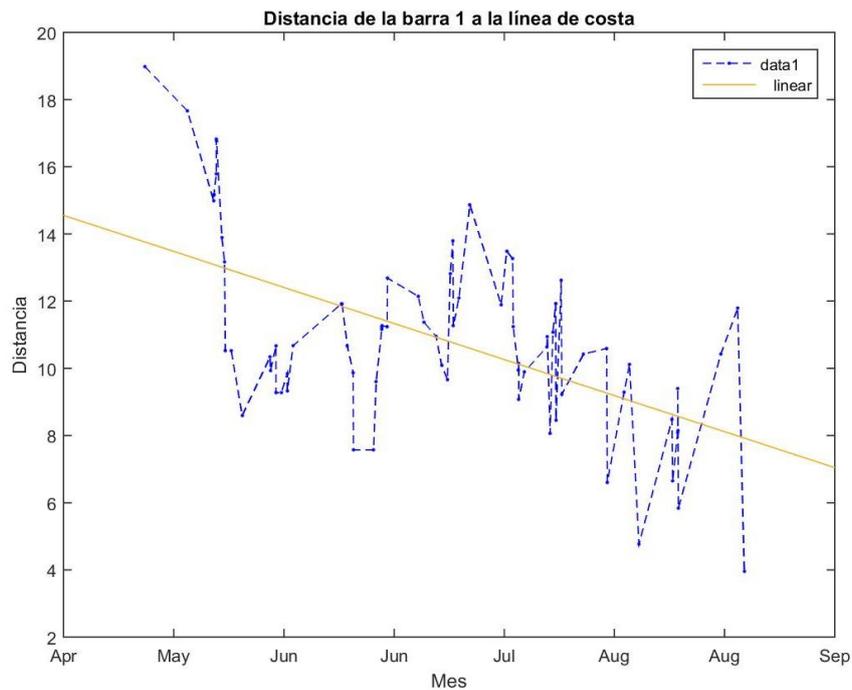


Figura 65. Variación de la distancia de la barra 1 en el tiempo

En el siguiente gráfico se ha dibujado una barra por cada mes de estudio y se verifica que la barra se acerca a la costa (línea azul en el gráfico) hasta llegar a unirse con la zona de playa húmeda.

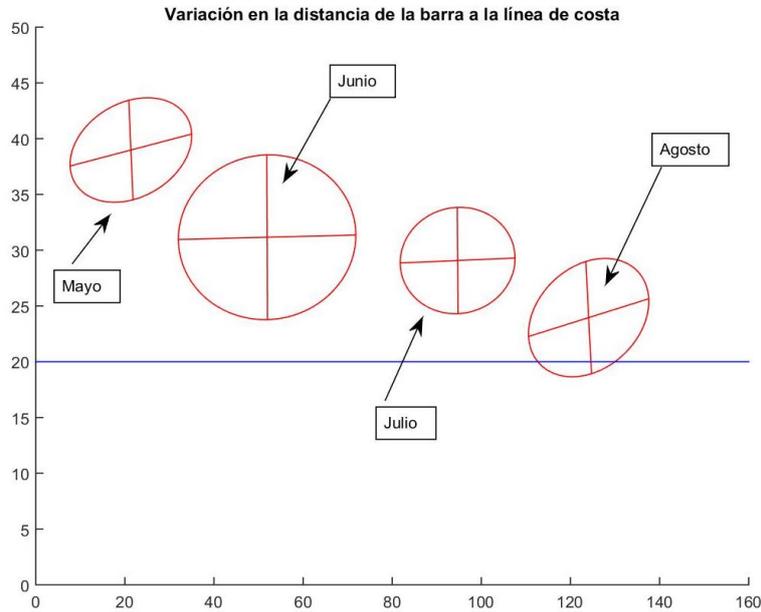


Figura 66. Representación de la variación de la distancia de la barra 1 con la línea de costa

Barra 2

En el caso de la barra 2 se observa que tiende a alejarse de la zona de playa, entre junio y julio se mantiene relativamente constante y a partir de julio tiende a aproximarse de nuevo.

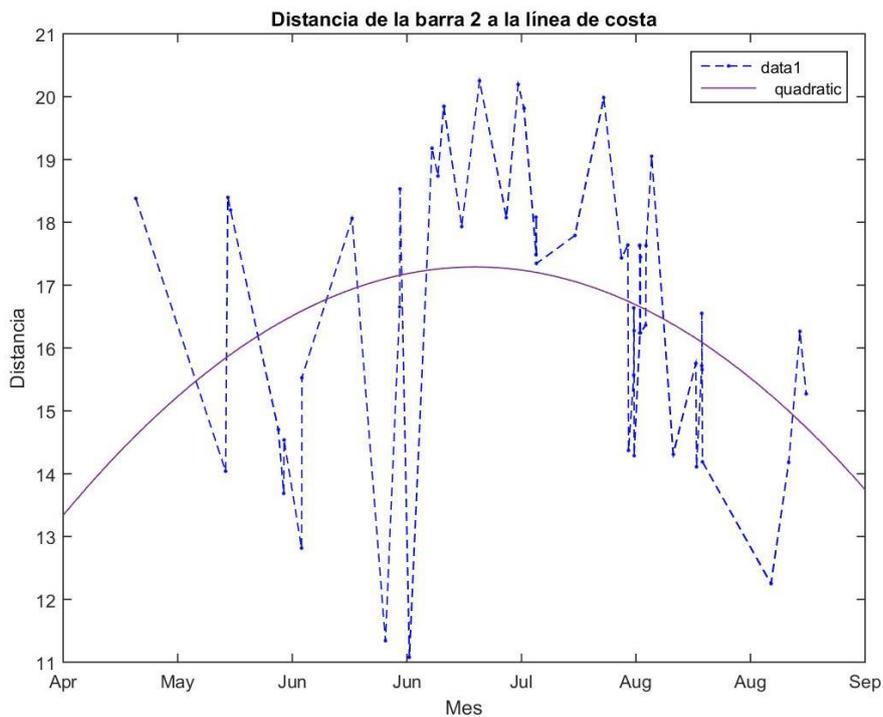


Figura 67. Variación de la distancia de la barra 2 en el tiempo

En el siguiente gráfico se ha dibujado una barra por cada mes de estudio y se verifica que la barra se aleja, se mantiene constante durante junio, julio y primero de agosto y a partir de agosto se acerca a la línea de costa.

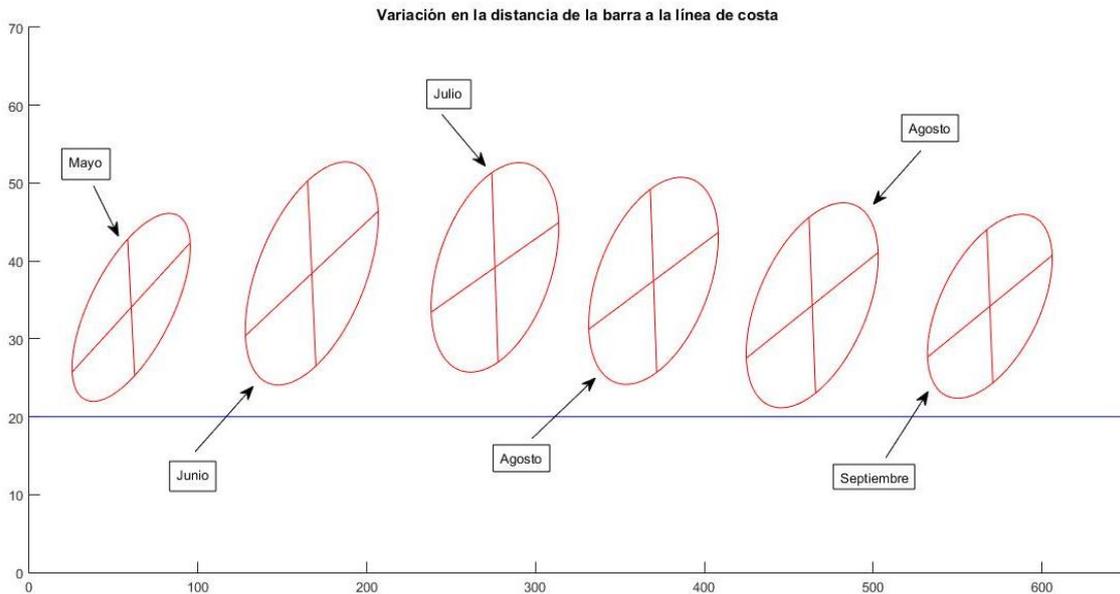


Figura 68. Representación de la variación de la distancia de la barra 2 con la línea de costa

E) Altura de ola significativa respecto a la distancia de la barra (en el tiempo)

En este apartado se ha promediado la altura de ola de un día desde la hora de la imagen, se ha realizado esta operación porque la posición de una barra viene condicionada por oleajes previos por lo que al aumentar los periodos se espera que la correlación aumente.

Barra 1

Se observa que, aunque la dispersión es alta, al aumentar la altura de ola la distancia de la barra respecto a la línea de costa aumenta.

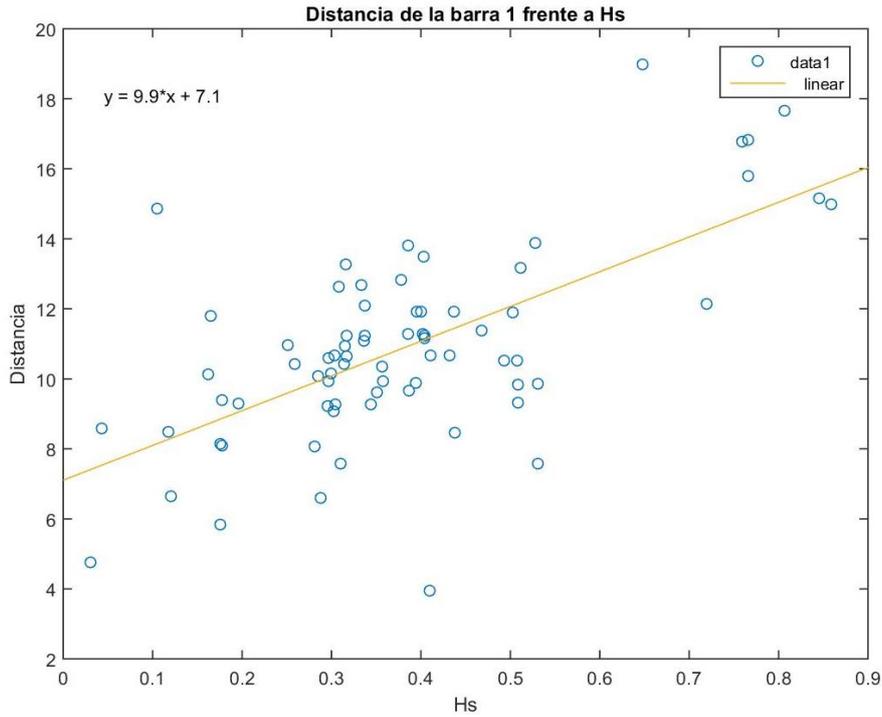


Figura 69. Variación de la distancia de la barra 1 frente a la altura de ola significativa

Se ha representado igualmente la distancia respecto a la altura de ola y el tiempo y se ve una tendencia de disminución del oleaje en los meses de verano. En estos meses las barras tienden a acercarse a la línea de costa.

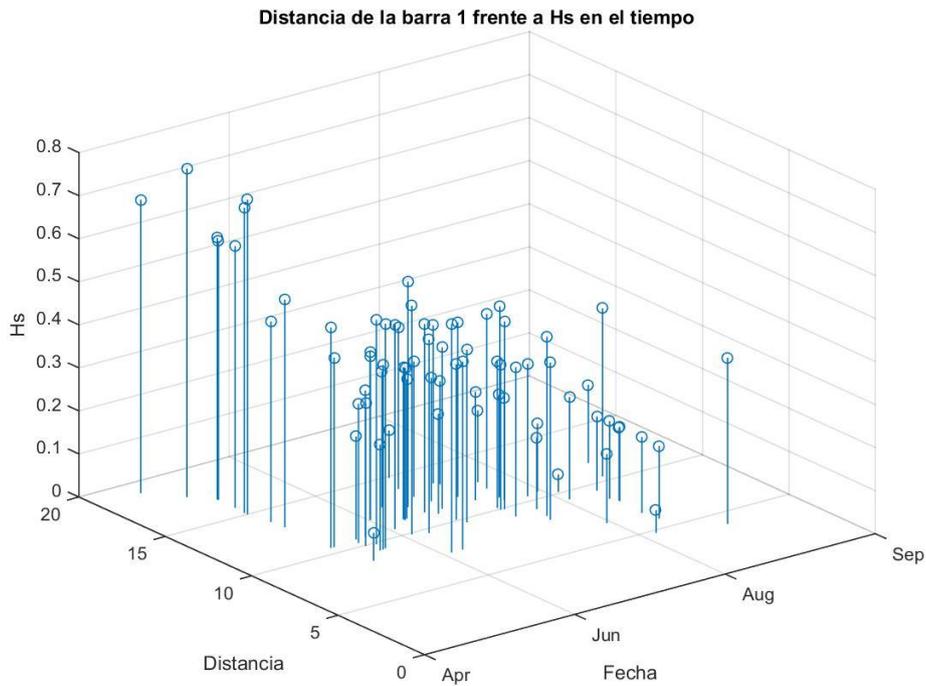


Figura 70. Variación de la distancia de la barra 1 en el tiempo respecto a la altura de ola significativa

Barra 2

En el caso de la barra 2, la correlación no es tan clara. Es posible que al estar por detrás de la barra 1, ésta la proteja y el oleaje no incida tanto sobre ella haciendo que una distancia se mantenga durante un periodo más largo de tiempo.

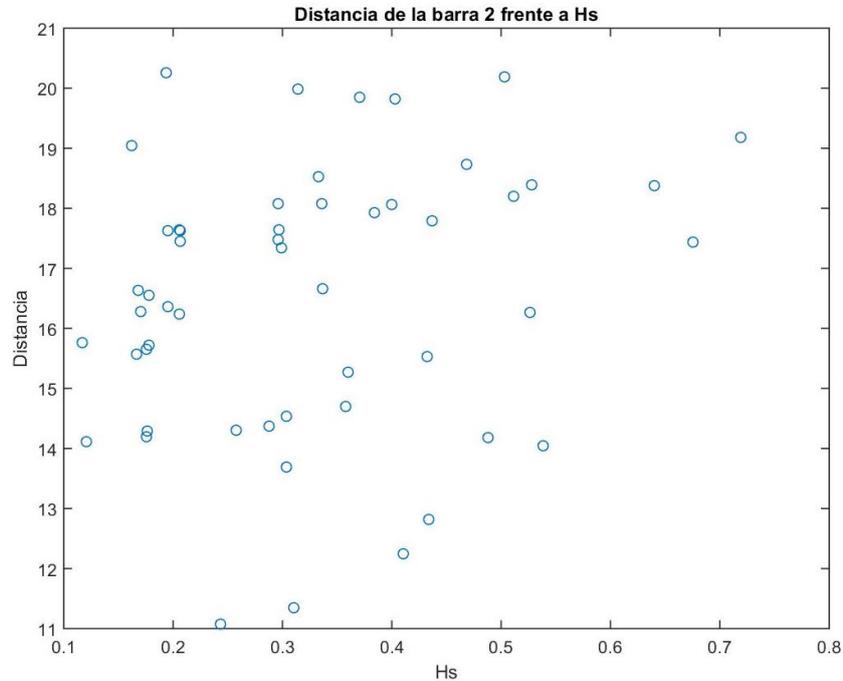
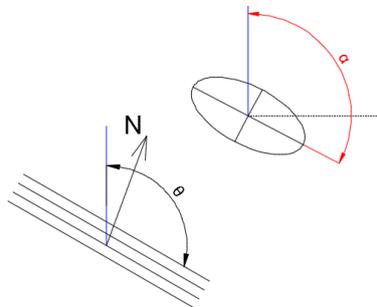


Figura 71. Variación de la distancia de la barra 2 frente a la altura de ola significativa

F) Dirección del oleaje respecto a la orientación de la barra

Se buscó una correlación entre la dirección del oleaje y la orientación de la barra.

Para ello se compararon el ángulo de orientación de la barra, α , que es el ángulo que forma el semieje mayor con la horizontal, y la dirección del oleaje θ . Se buscó la correlación midiendo ambos ángulos desde un mismo eje de referencia que se decidió que fuera la vertical.



Se observó una gran dispersión en los resultados por lo que se debe seguir estudiando. Un aumento de valores de direcciones de Estados de mar anteriores puede disminuir la dispersión observada.

4.3.5 CONCLUSIONES

Las conclusiones del capítulo son:

- 1) Se aplicó la metodología en la playa del Puntal para:
 - 1.1) Obtener la evolución de la línea de costa mensual y anual
 - 1.2) Cuantificar la evolución de las barras intermareales de la playa
- 2) Se detectó la evolución de la línea de costa en los dos periodos, un mes y un año; y se pudo ver la evolución de las barras.
- 3) Se han parametrizado las barras mediante elipses obteniendo resultados satisfactorios.
- 4) Se han correlacionado los parámetros de las elipses con los datos del oleaje:
 - 4.1) Las dimensiones de las barras aumentan durante los meses de verano (Junio, Julio y Agosto) cuando la altura de ola es menor.
 - 4.2) Las barras tienden a acercarse o mantenerse a una distancia relativamente constante en los meses de verano, cuando la altura de ola es menor. Expresado de otra forma, la altura de ola es proporcional a la distancia, a mayor altura de ola mayor distancia a la línea de costa y viceversa.
 - 4.3) Las barras tienden a situarse paralelas a la línea de costa durante los meses de verano.
 - 4.4) Las barras tienden a situarse paralelas al oleaje.

5. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 CONCLUSIONES

El objeto principal del trabajo es

- 1) Explorar las posibilidades de usar la Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) en el procesamiento de imágenes digitales
- 2) Desarrollar una metodología para detectar la línea de costa a partir de las imágenes, usando EOFs
- 3) Aplicar la metodología a casos de estudio

Las conclusiones generales que se obtienen del trabajo son:

- Se exploró la posibilidad de usar las funciones empíricas Ortogonales para procesar imágenes, se encontraron diferentes aplicaciones en función de cómo se aplique la técnica de EOFs y al número de imágenes utilizadas
- Aplicando la técnica a una imagen se encontró que el modo 1 corresponde al valor medio de los canales del color de la imagen, el modo 2 permite diferenciar la parte de tierra y de agua, y el modo 3 representa la variabilidad de menor escala, “ruido”.
- Al aplicar la técnica a una serie de imágenes se puede separar aquellas imágenes que se ven correctamente de las que no sirven porque son demasiado oscuras o no tienen la calidad adecuada para ser analizadas.
- Se desarrolló una metodología para detectar la línea de costa de forma automática a un conjunto de imágenes. Este algoritmo se puede incorporar directamente a una estación de cámaras o usarse a posteriori.
- La metodología requiere detectar las imágenes que se ven correctamente, predefinir unas líneas de costa realizadas por el usuario, determinar unos coeficientes característicos de cada playa y aplicar los EOFs
- Se aplicó la metodología a dos playas: la playa del Puntal para un periodo de un año (2009) y se encontró que en un 90.3% de imágenes la metodología detecta correctamente las líneas de costa. En la playa del Sardinero se encontró que los resultados no son tan satisfactorios, debido a que las cámaras que se disponen de esa playa no han sido pensadas para detectar la línea de costa, sino para detectar el número de personas que hay en la misma, por tanto aunque la técnica es válida y en ciertos casos detecta correctamente la línea de costa, hay factores en la posición, distancia y calidad de la cámara que afectan a los resultados de la metodología.
- Se aplicó la metodología para ver la evolución de la línea de costa en El Puntal, se analizó el mes de junio donde se observan las modificaciones que se dan en la línea de costa por la evolución de las barras intermareales y se posteriormente se analizó la serie completa del año 2009 viendo así la evolución anual de la línea de costa. Esta metodología permite obtener información de gran interés de la costa sin necesidad de datos de campo lo que supone un ahorro económico.

- Se aplicó la metodología para detectar las barras intermareales de la playa del Puntal, se analizó el periodo de los meses mayo a septiembre del año 2003. En este periodo se observan importantes cambios en las barras así como su migración hasta la costa. Estos cambios fueron parametrizados ajustando una elipse a las barras

5.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo se ha centrado en general un modelo que realice la detección automática de la línea de costa a partir de las Funciones Empíricas Ortogonales en imágenes y en estudiar la evolución de la misma. Además se ha estudiado el desarrollo de las barras obteniendo sus parámetros fundamentales a partir de una modelización de una elipse.

Una vez obtenidos todos los resultados y llegado a las conclusiones se ve que todavía quedan aspectos por mejorar o incluso definir, quedando así futuras líneas de investigación que son las siguientes:

- Mejora en la detección de imágenes válidas a partir de los modos espaciales, ya que se ha visto que en ciertas situaciones meteorológicas como niebla, lluvia no siempre descarta estas imágenes que no serían válidas.
- Determinación de la batimetría intermareal aplicando la metodología de detección de la línea de costa a partir de las EOFs
- Determinación de la topografía de la playa (zona supramareal)
- En cuanto a la evolución de la playa, poder determinar la línea de costa y barras de forma sencilla a través de tiempo permite obtener información valiosa de la evolución de la playa de tal forma que nos permitirá desarrollar modelos de evolución, obtener información para calibrar y validar los modelos, etc.

BIBLIOGRAFÍA

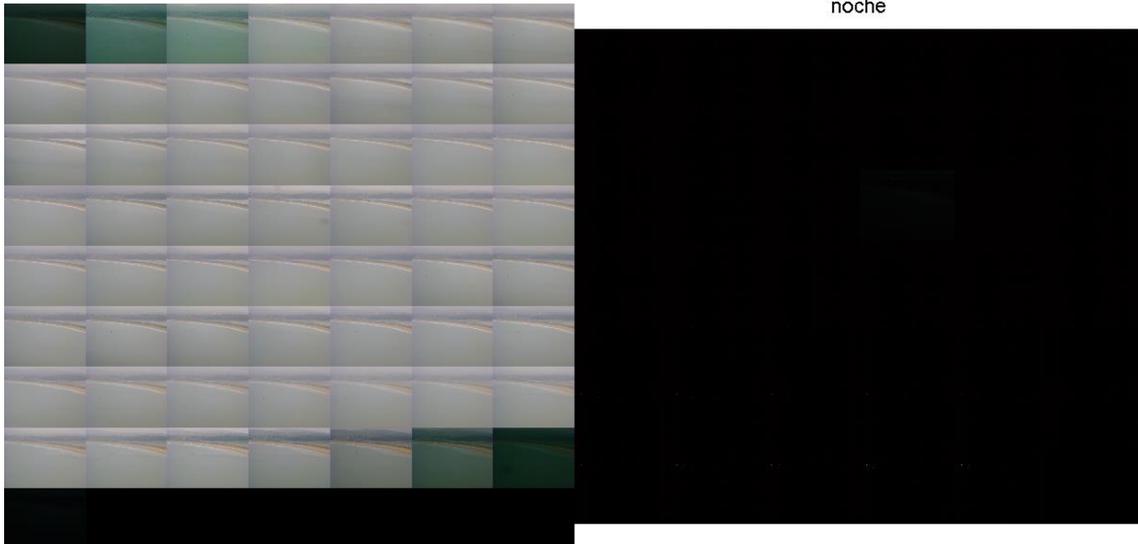
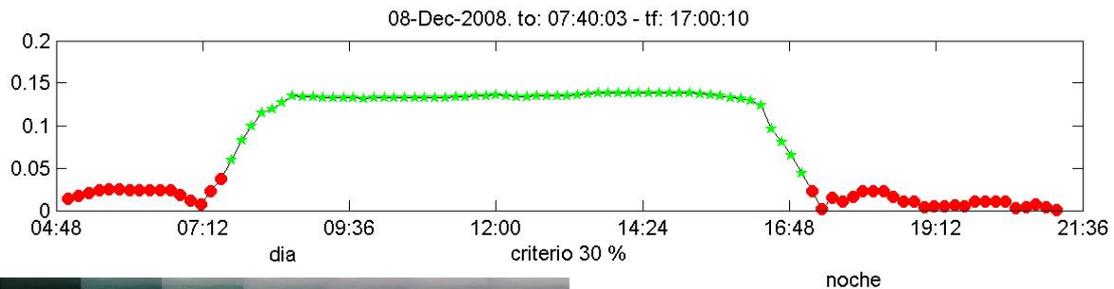
- ArcGis. (s.f.). *ArcGis*. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>
- Colombo, L., & Lafuente, R. (2012). El uso de la descomposición en valores singulares para el tratamiento de imágenes. *matematicalia*, 1-2.
- H.Björnsson, & Venegas, S. (Febrero de 1997). *jsg.utexas.edu*. Obtenido de <http://www.jsg.utexas.edu/>
- (2014). *Impactur*.
- Ministerio de Agricultura, A. y. (6 de Marzo de 2015). <http://www.magrama.gob.es/>.
- Muñoz, J. J., L.Tejedor, & R.Medina. (2001). Las funciones empíricas ortogonales y los cambios en el perfil de playa a corto, medio y largo plazo. *Física de la Tierra*.
- Osorio, A. F. (2005). Desarrollo de técnicas y metodologías basadas en sistemas de vídeo para la gestión de la costa. 30-41.
- Pérez-Marrero, J., Maroto, L., & Llinás, O. (2004). Climatología por satélite de los aerosoles saharianos y del fitoplacton en el atlántico macaronésico. *Teledetección*, 19-23.
- Pesca, C. E. (15 de Octubre de 2015). <http://www.cepesca.es/>.
- (2014). *Puerto de Santander*.
- Puerto de, S. (s.f.).
- Small, C., & Milesi, C. (2013). Multi-scale standardized spectral mixture models. *Elsevier*, 1-13.
- Yesid Carvajal Escobar, J. B. (2004). Análisis de Variabilidad de datos medioambientales aplicando Funciones Ortogonales Empíricas o Componentes Principales. *EIDENAR*.

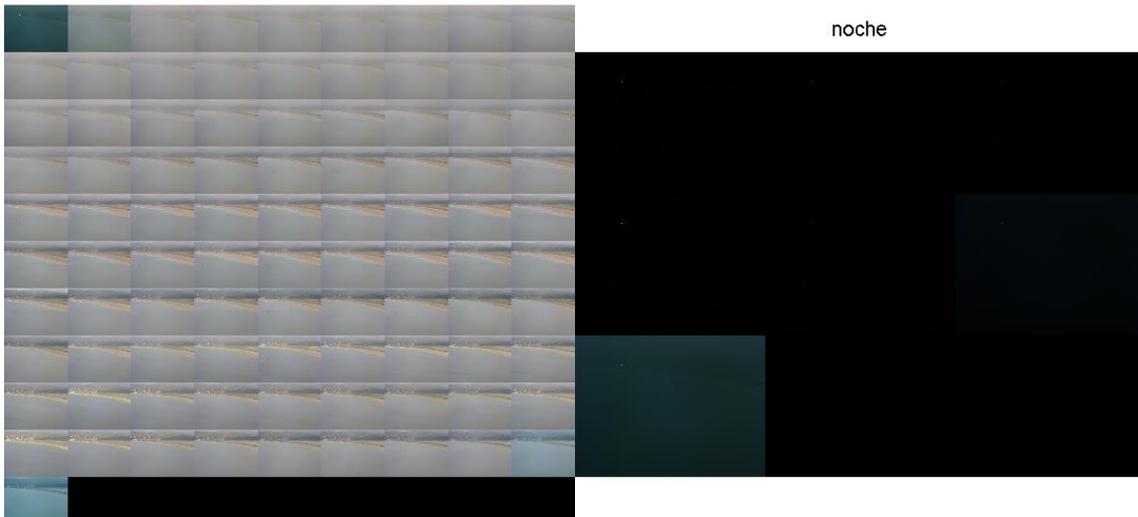
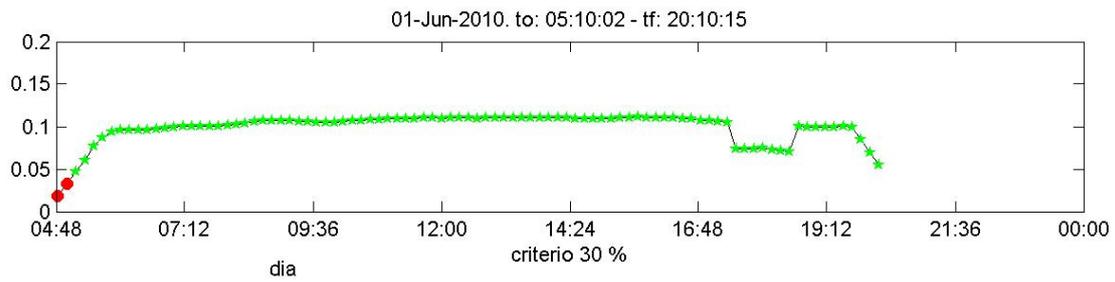
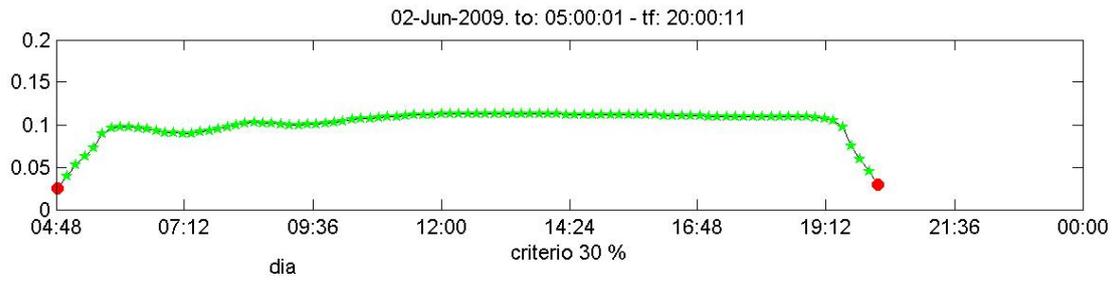
ANEXO 1:

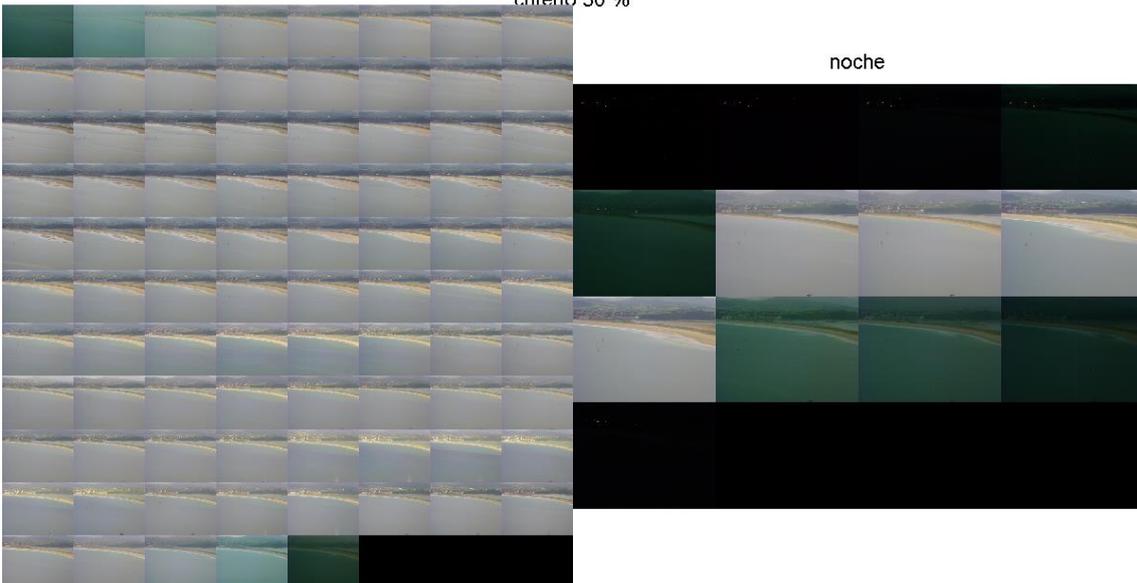
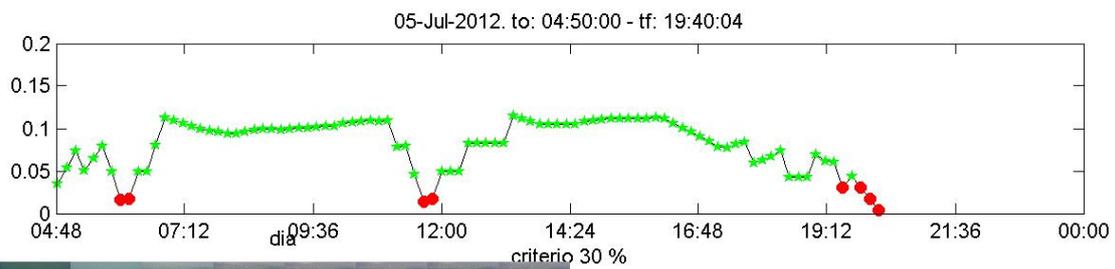
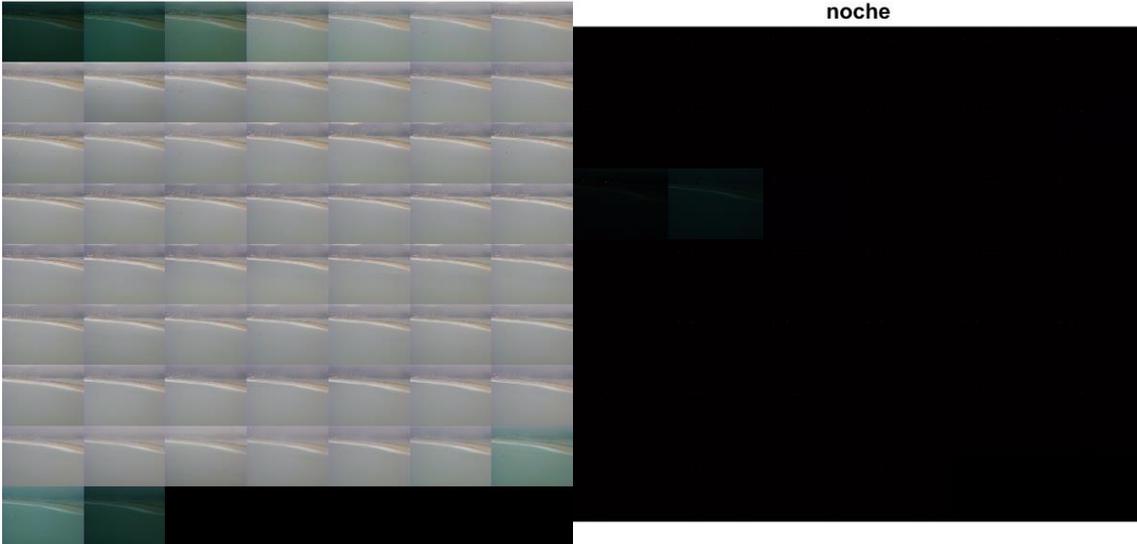
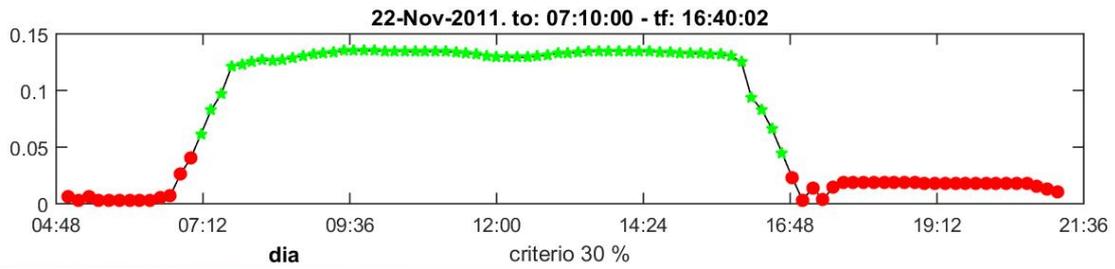
**DETECCIÓN DE IMÁGENES DIURNAS Y NOCTURNAS
EN EL PUNTAL Y SARDINERO**

En el presente anexo se representan los resultados obtenidos de calcular la variabilidad temporal del modo espacial 2 de un día y discriminar las imágenes de calidad (día) de las oscuras (noche). El criterio de discriminación empleado ha sido el 30% de la variabilidad máxima, si la variabilidad de una imagen en una hora concreta es mayor del 30% de la variabilidad máxima la imagen es día, si es menor, la imagen es noche.

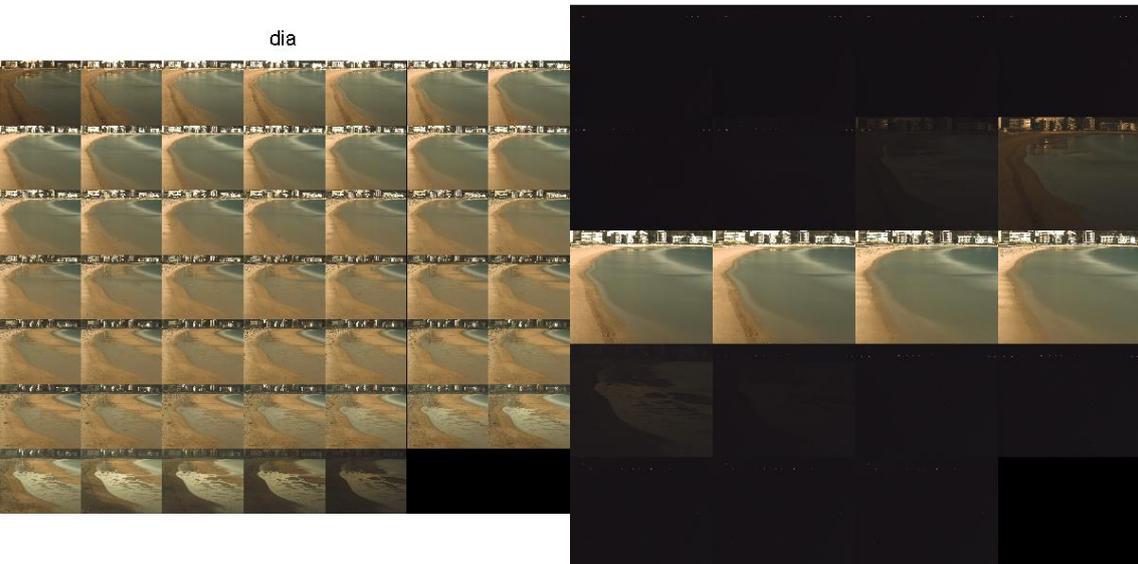
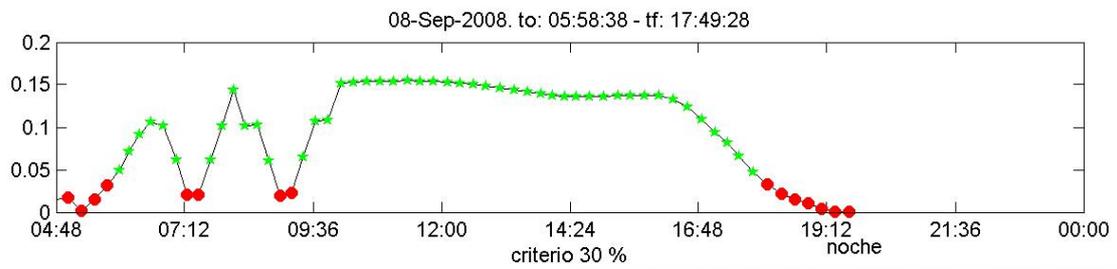
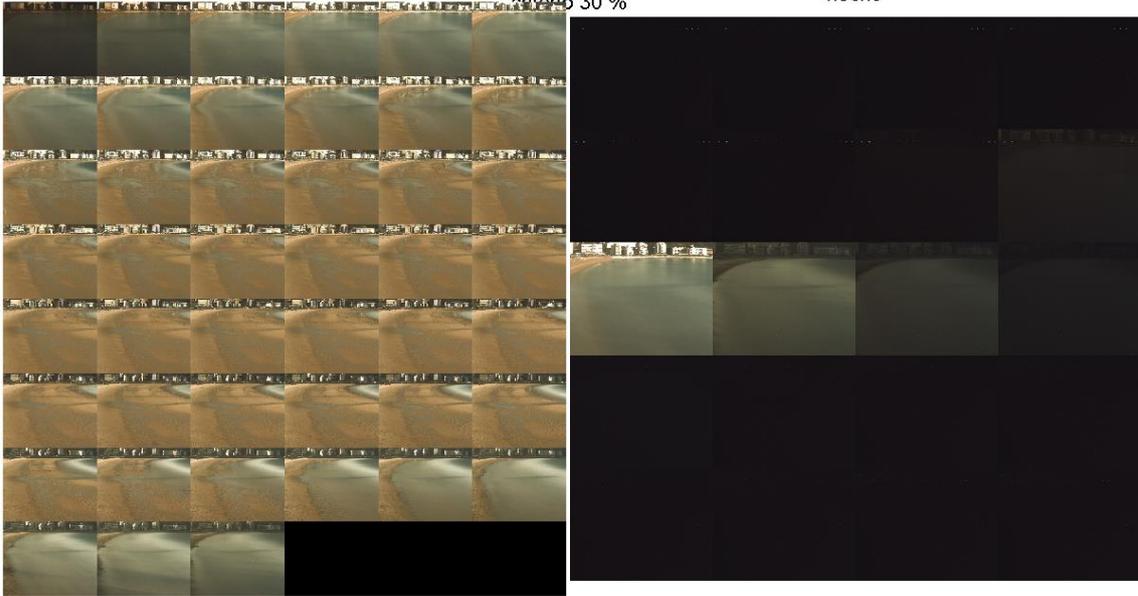
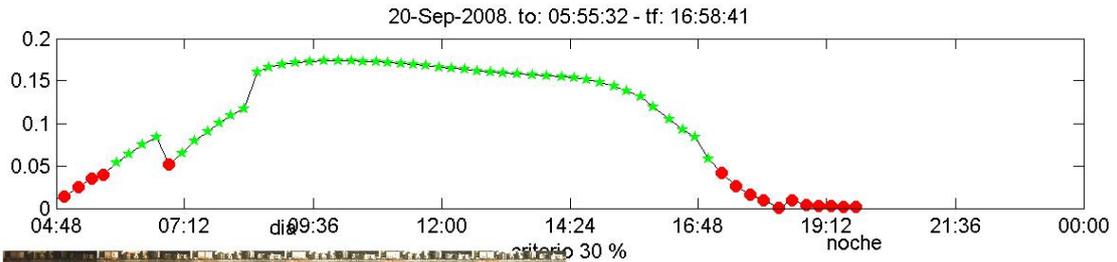
PUNTAL

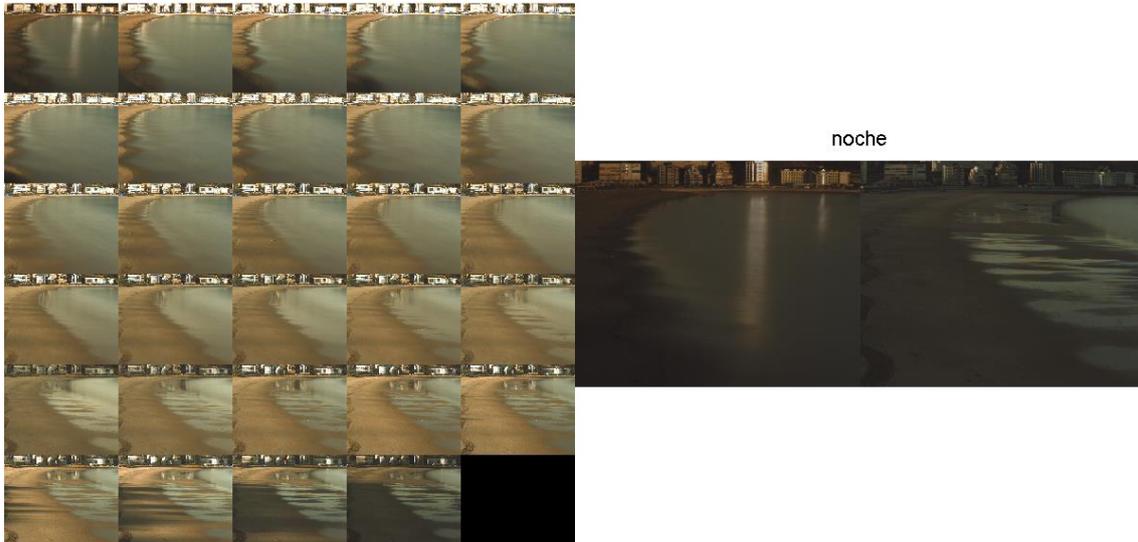
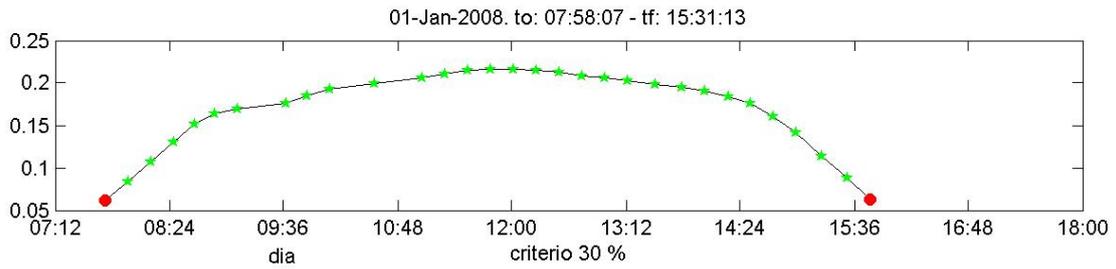
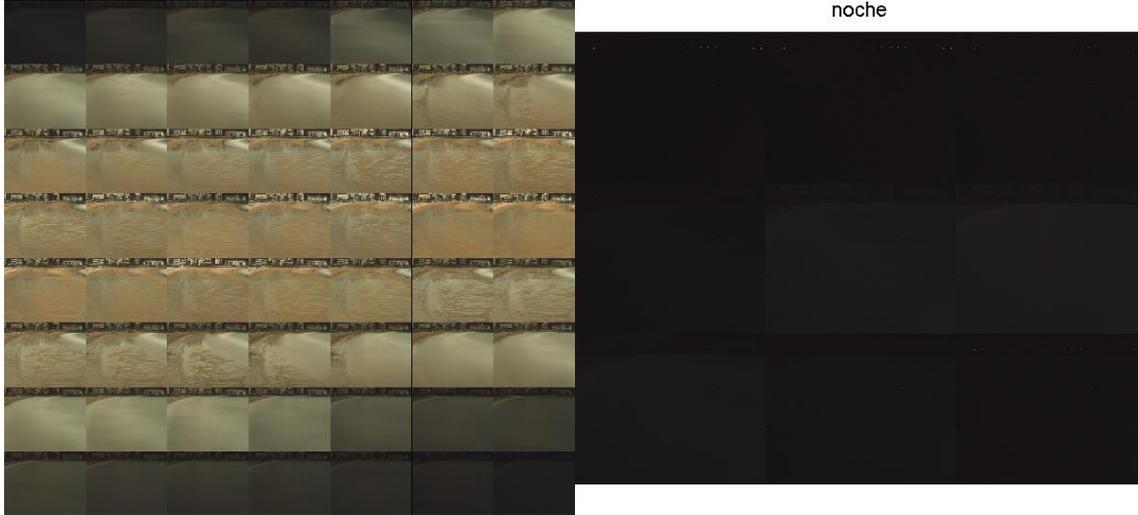
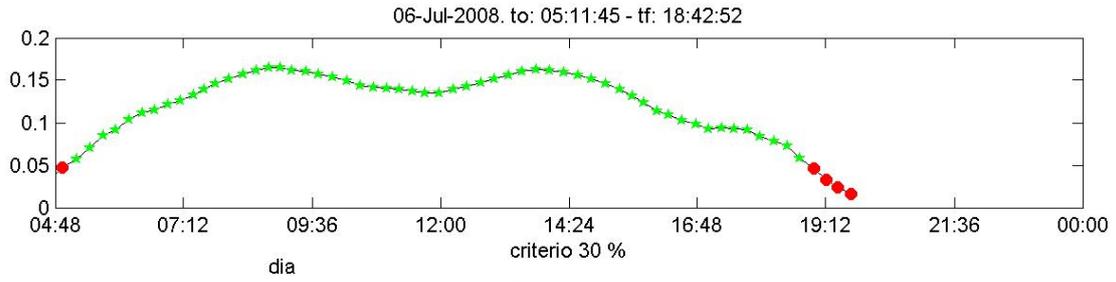






SARDINERO





ANEXO 2:

**DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PUNTAL
Y EL SARDINERO**

Se representan en las siguientes figuras algunas de las 250 líneas de costa que se digitalizaron para poder ajustar y validar el modelo automático de detección de la línea de costa.

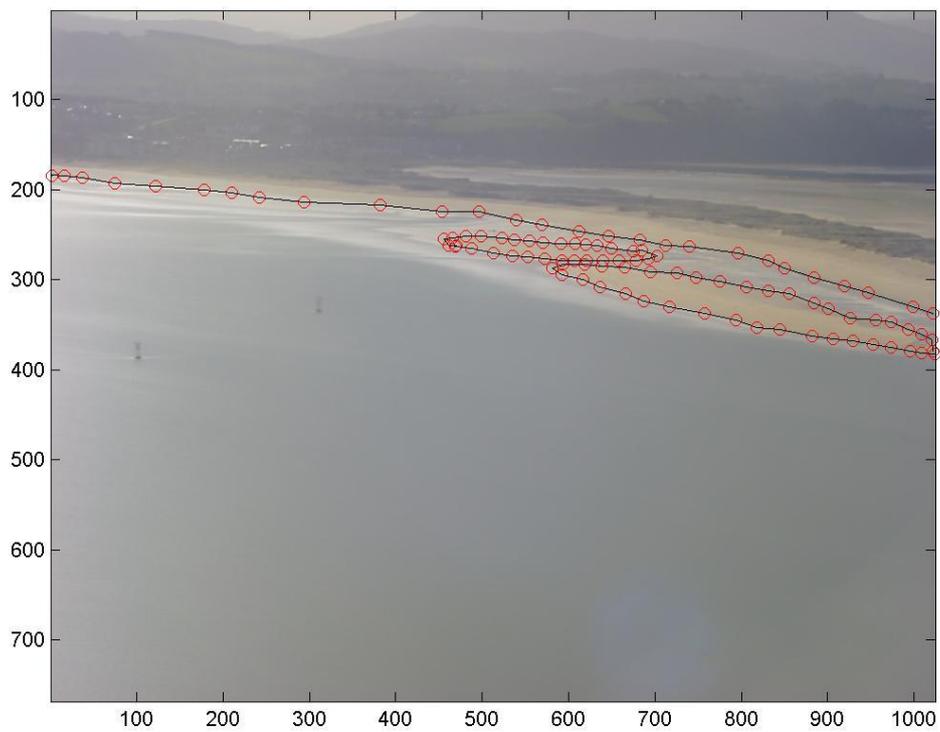
PUNTAL



20-May-2009 17:10:08



07-Apr-2009 08:10:01



13-Jan-2009 14:50:06

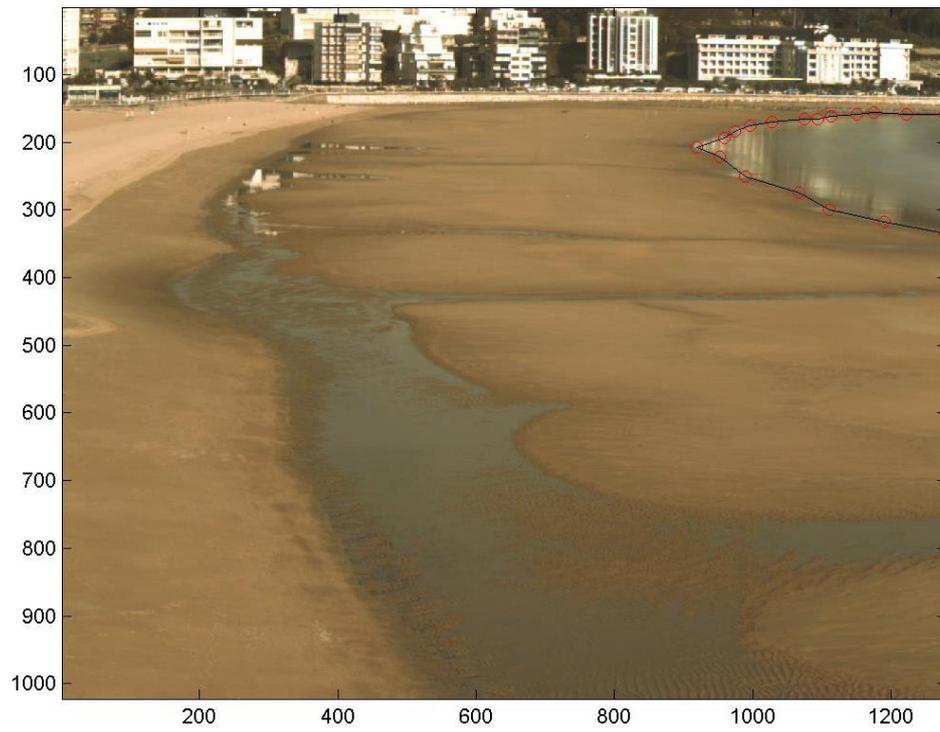


25-Aug-2011 16:30:06

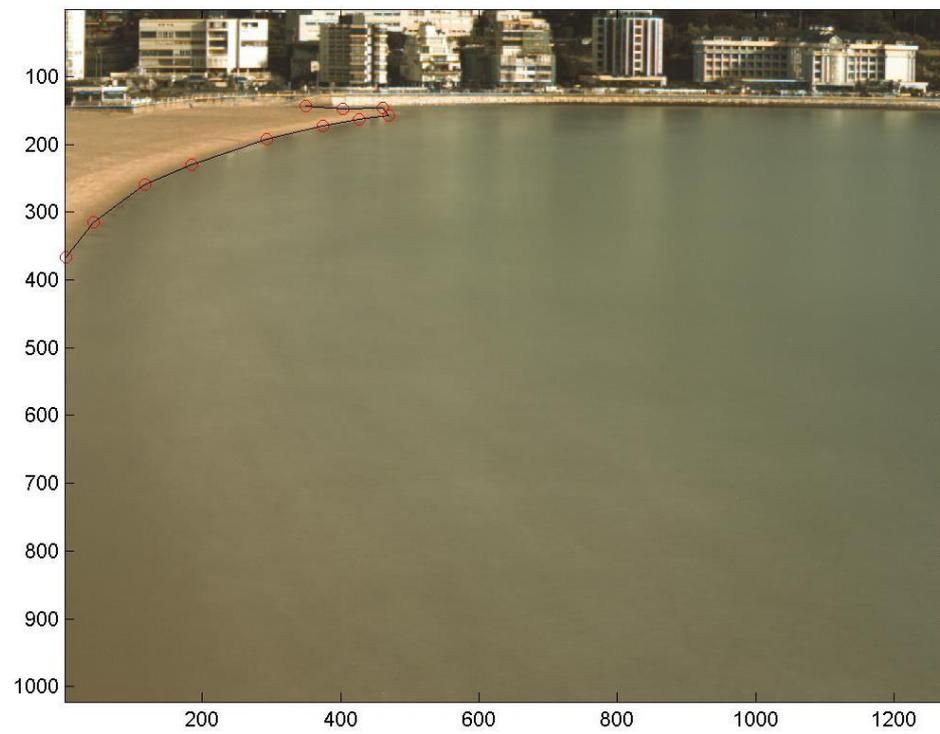


SARDINERO

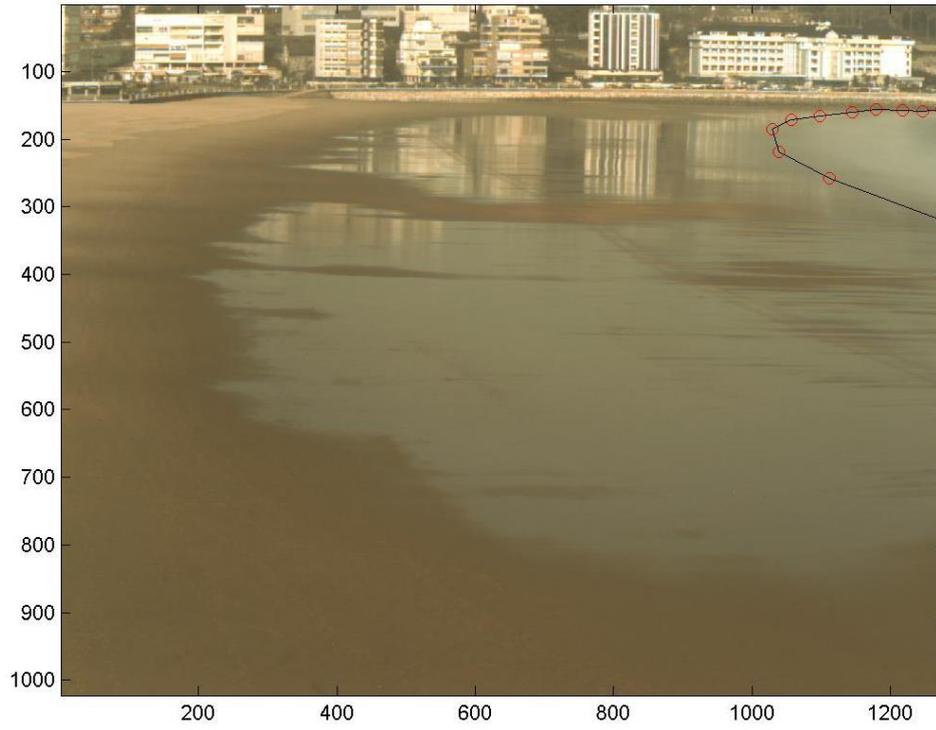
27-Sep-2008 08:35:39



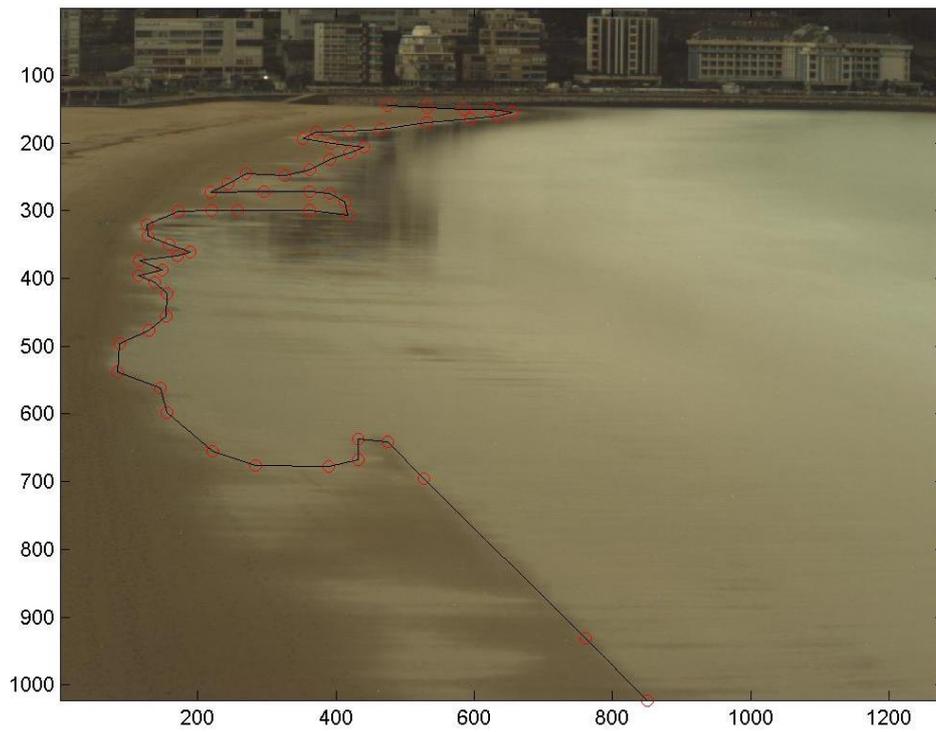
26-May-2008 06:33:27



28-Jan-2008 11:03:03



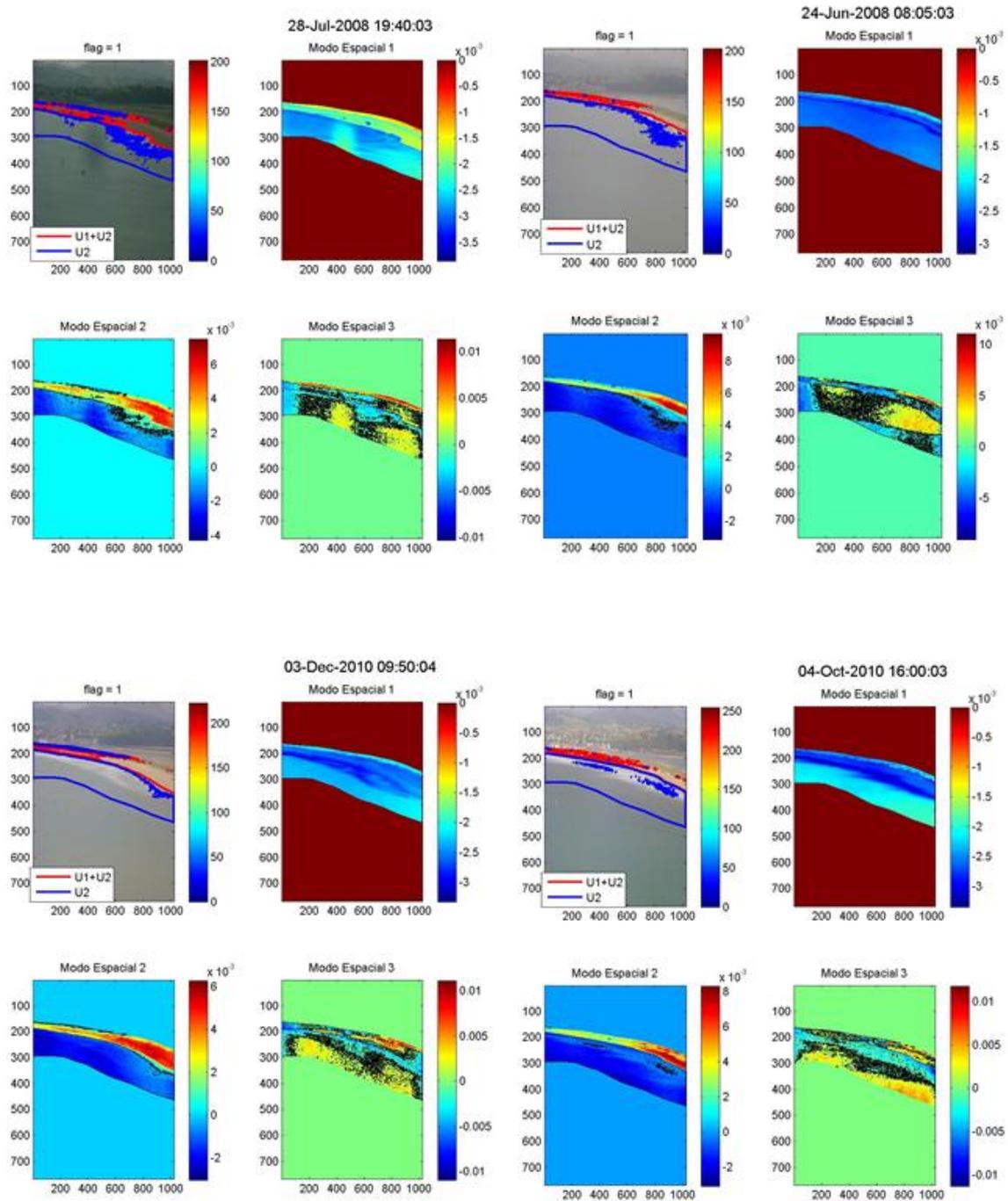
14-Jan-2008 10:00:38

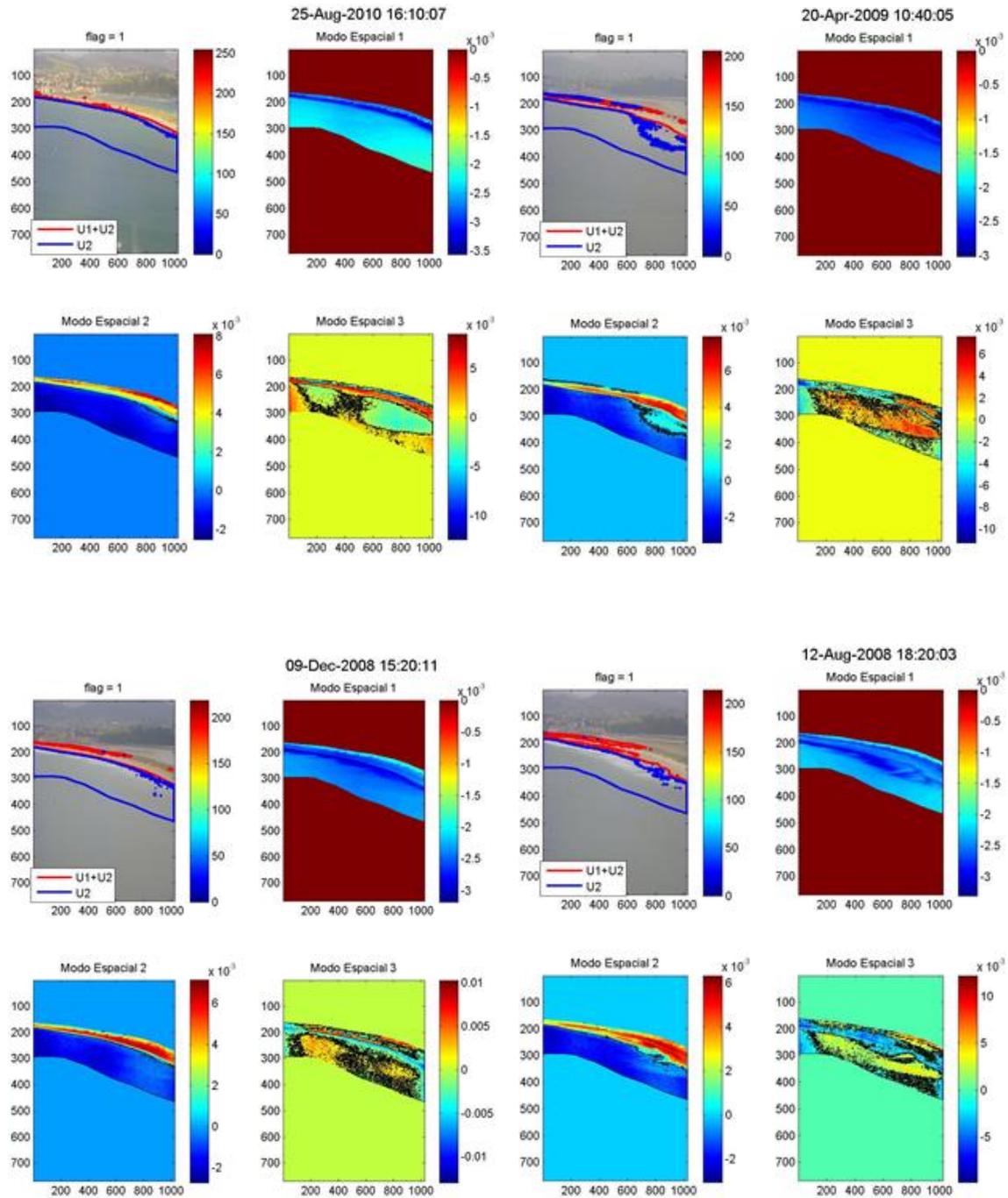


ANEXO 3:

**MODOS ESPACIALES EN EL ÁREA DE ACTUACIÓN
EN EL PUNTAL**

En las siguientes figuras se muestran algunos de los resultados obtenidos de aplicar las EOFs en imágenes digitales de playa y representar la detección de la línea de costa mediante el contorno igual a cero de la suma de los modos espaciales uno y dos (línea roja) y el modo espacial dos (línea azul)

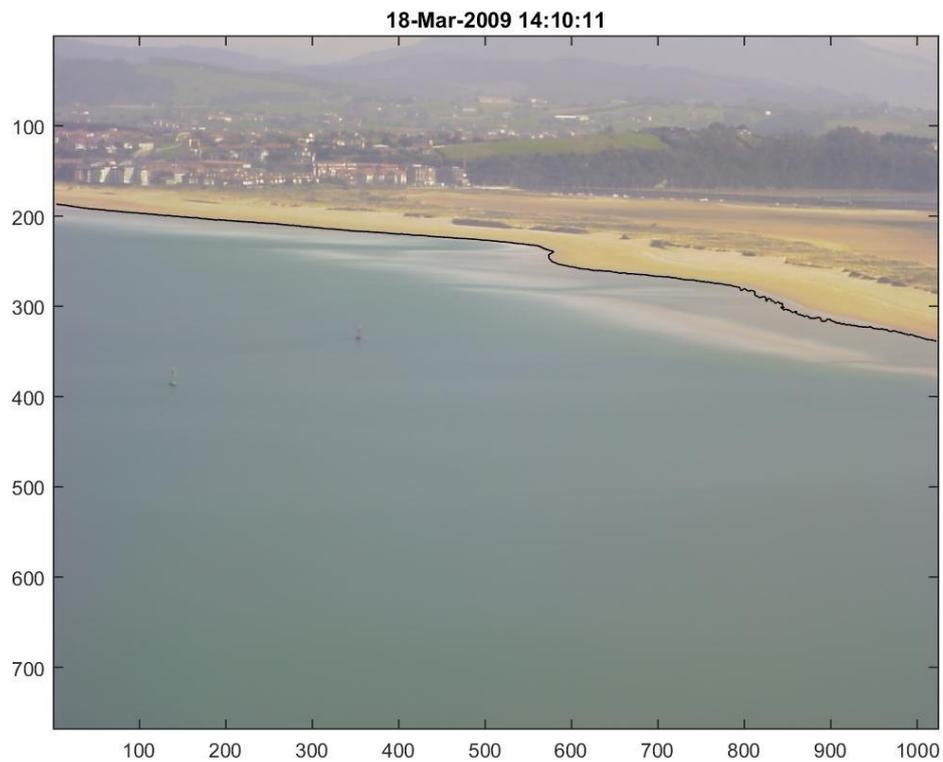




ANEXO 4:

DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA MEDIANTE EL PRIMER NIVEL DE APROXIMACIÓN

En el presente anexo se representan algunos de los resultados obtenidos de aplicar el primer nivel de aproximación que consiste en representar el contorno igual a cero de la suma de los modos espaciales uno y dos.



03-Mar-2009 16:00:10



15-Feb-2009 15:10:02



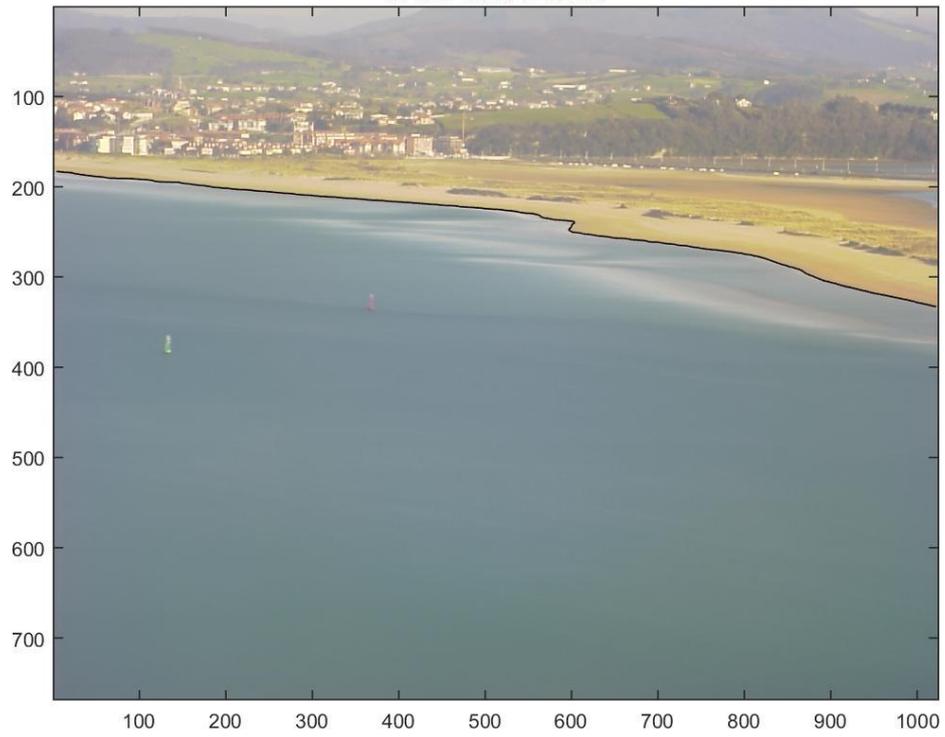
13-Feb-2009 14:00:12



11-Jan-2009 12:00:06



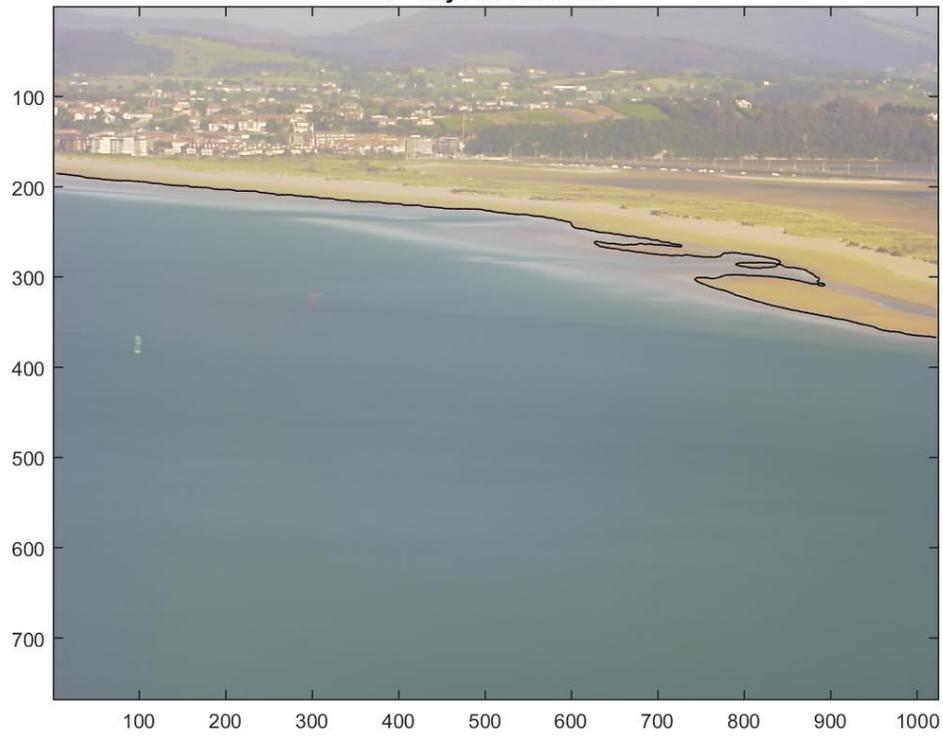
21-Mar-2009 17:00:06



12-Jun-2009 14:00:05



05-May-2009 17:10:07



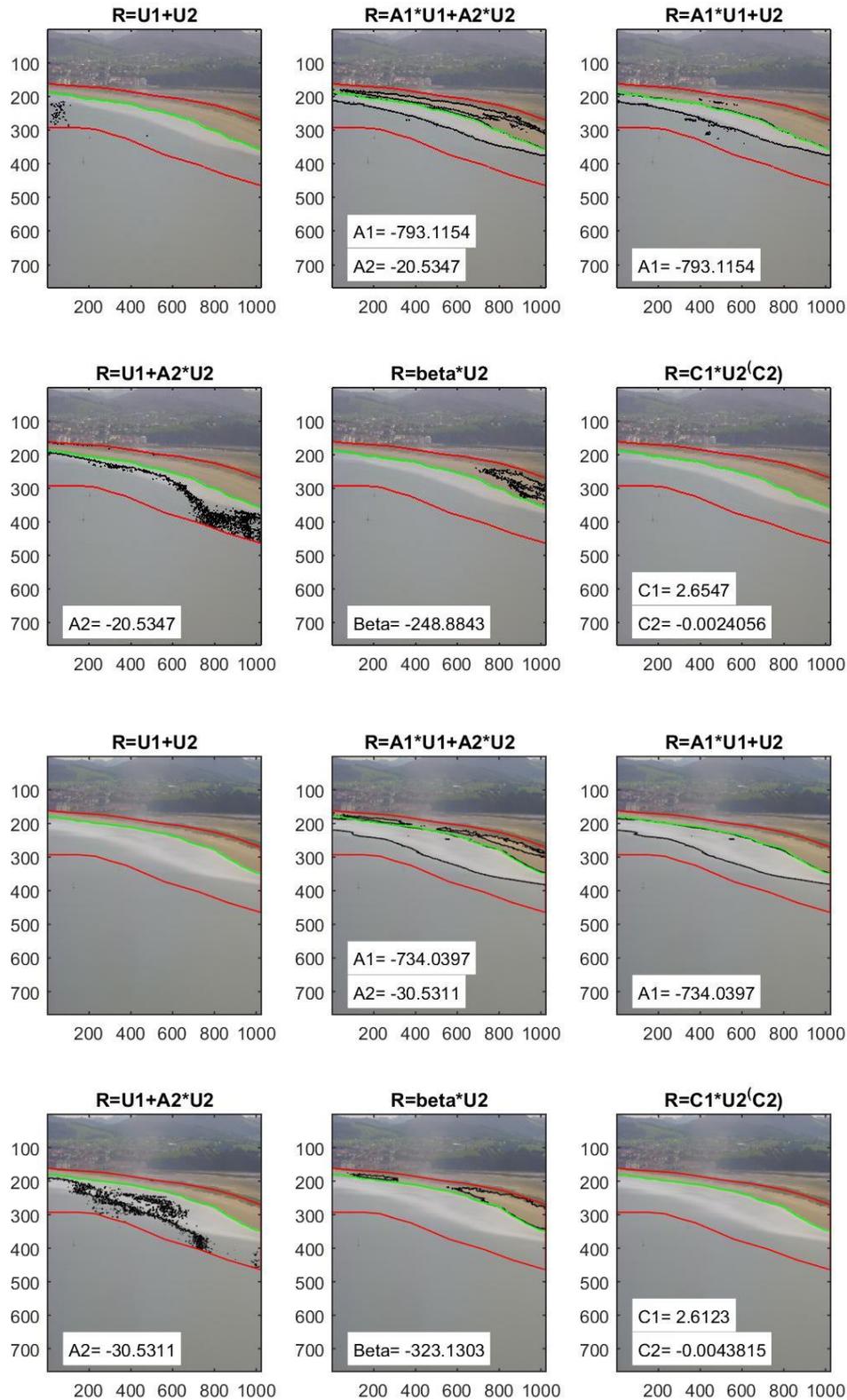
14-Jan-2009 14:00:07

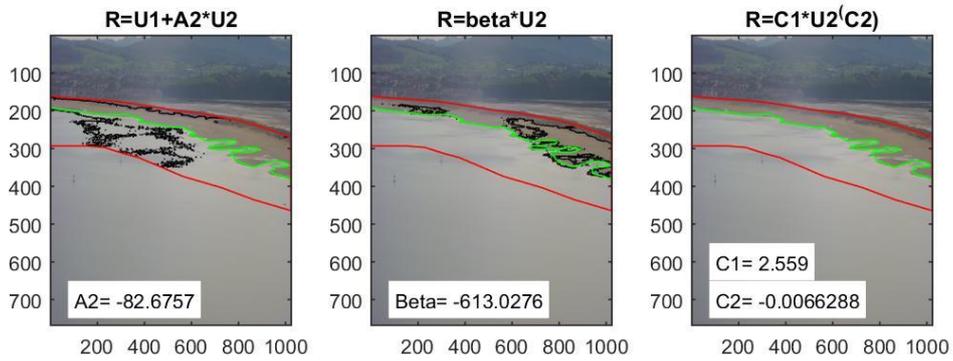
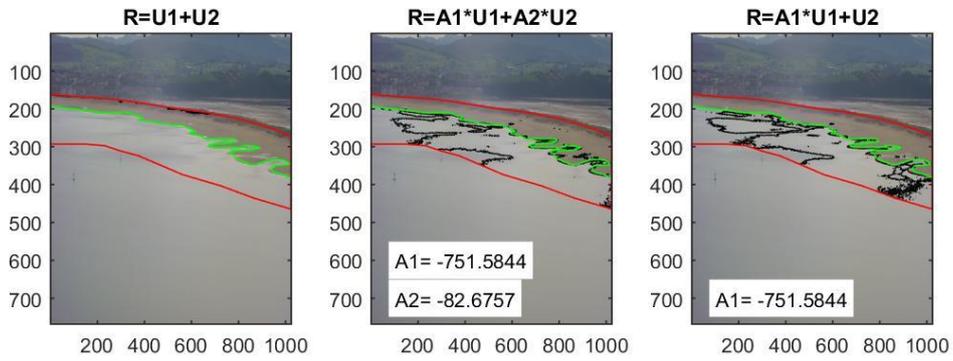
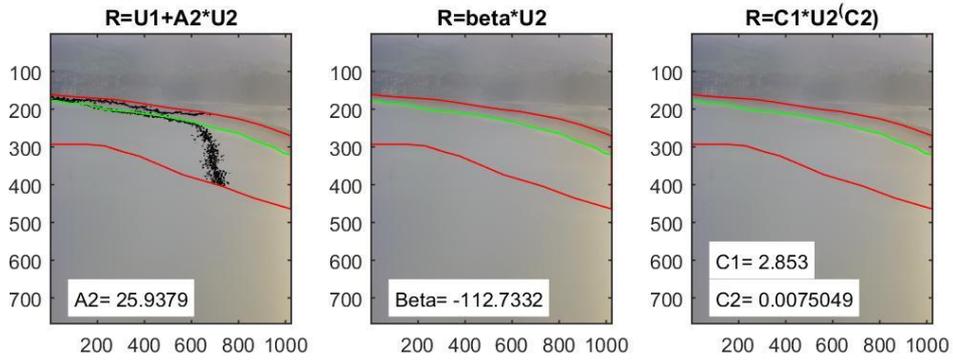
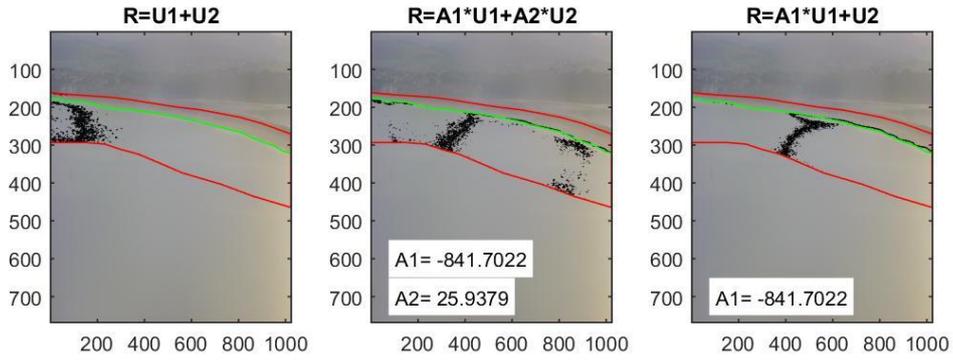


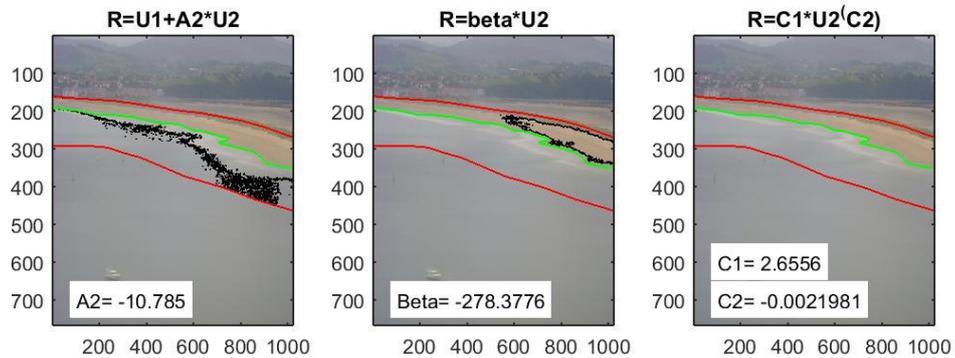
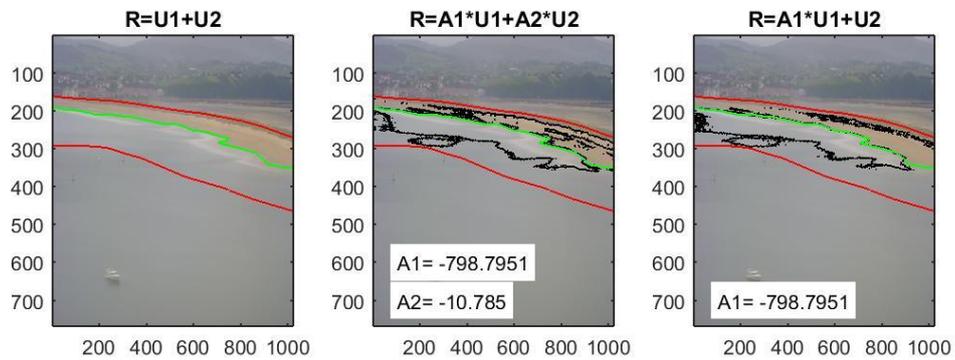
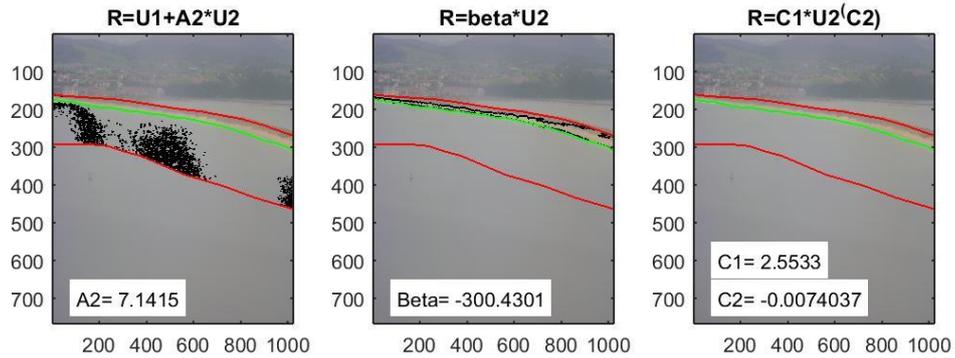
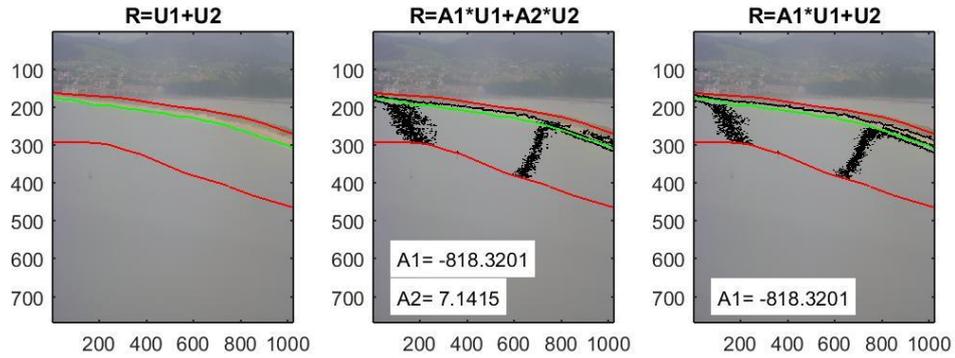
ANEXO 5:

**ESTUDIO DE POSIBILIDADES PARA EL SEGUNDO
NIVEL DE APROXIMACIÓN**

En las imágenes se muestran las cinco posibilidades que se plantearon junto con los coeficientes obtenidos. Las líneas rojas representan el contorno del área de actuación definido, la línea verde es la línea de costa digitalizada manualmente, y las líneas negras son el contorno igual a cero de R que representa la línea de costa que detecta cada modelo.







ANEXO 6:

DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN EL PUNTAL MEDIANTE EL SEGUNDO NIVEL DE APROXIMACIÓN

Se ha definido el segundo nivel de aproximación como el contorno igual a cero de la matriz línea de costa $LC = A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2$. Algunos resultados de aplicar este nivel de aproximación son los que se muestran.



27-Sep-2009 16:00:03



12-Aug-2009 15:05:20



15-Jul-2009 15:00:07



01-Feb-2009 11:00:01



06-Jan-2009 16:00:07



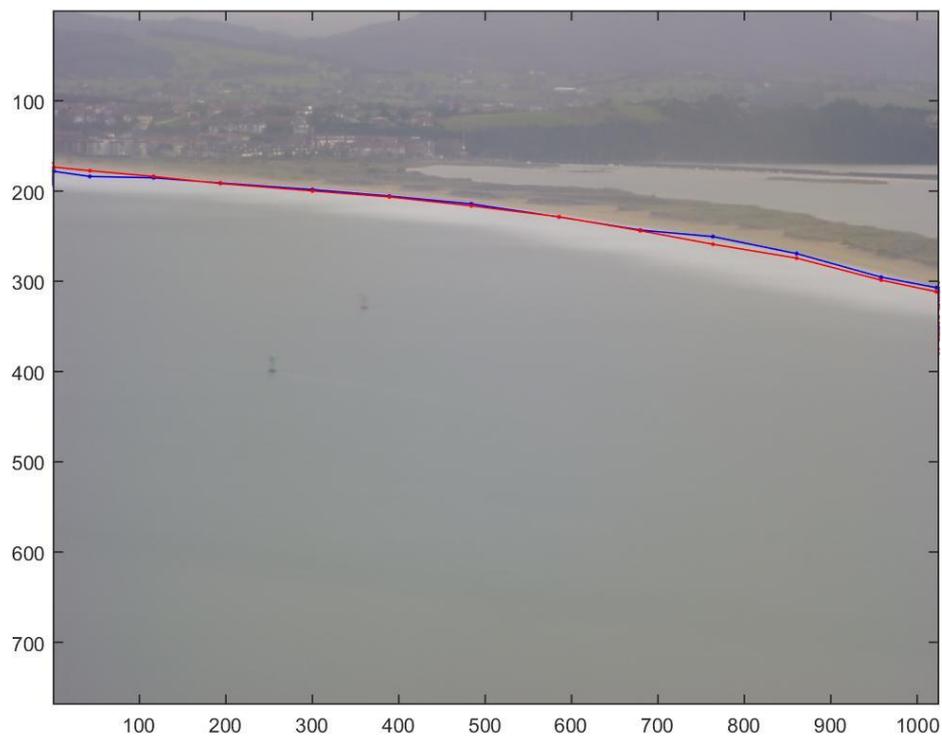
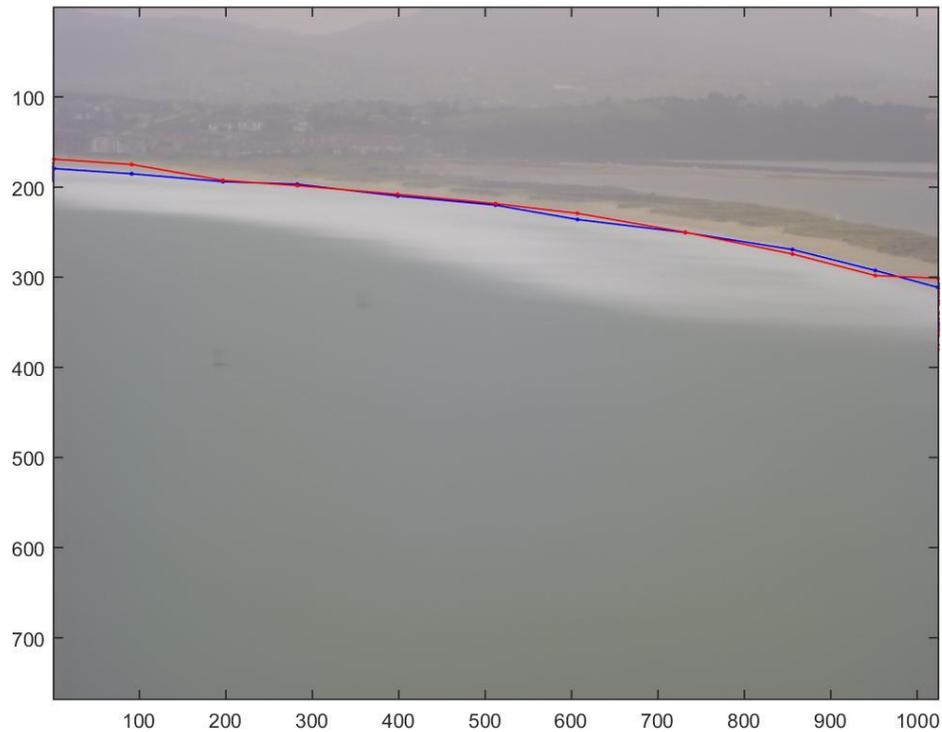
01-Jan-2009 14:00:11

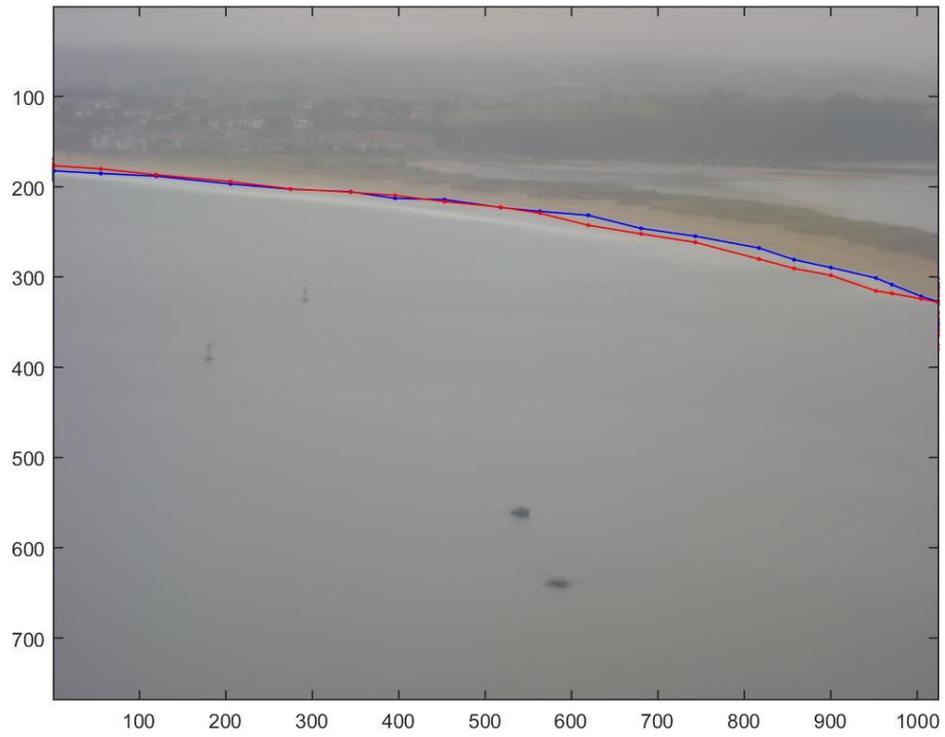


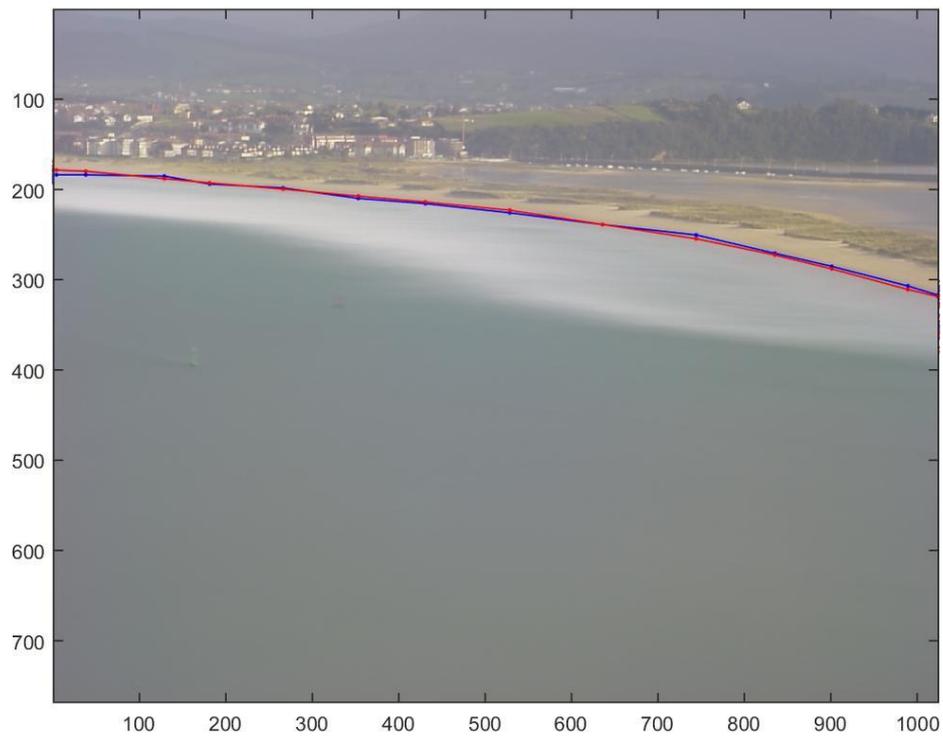
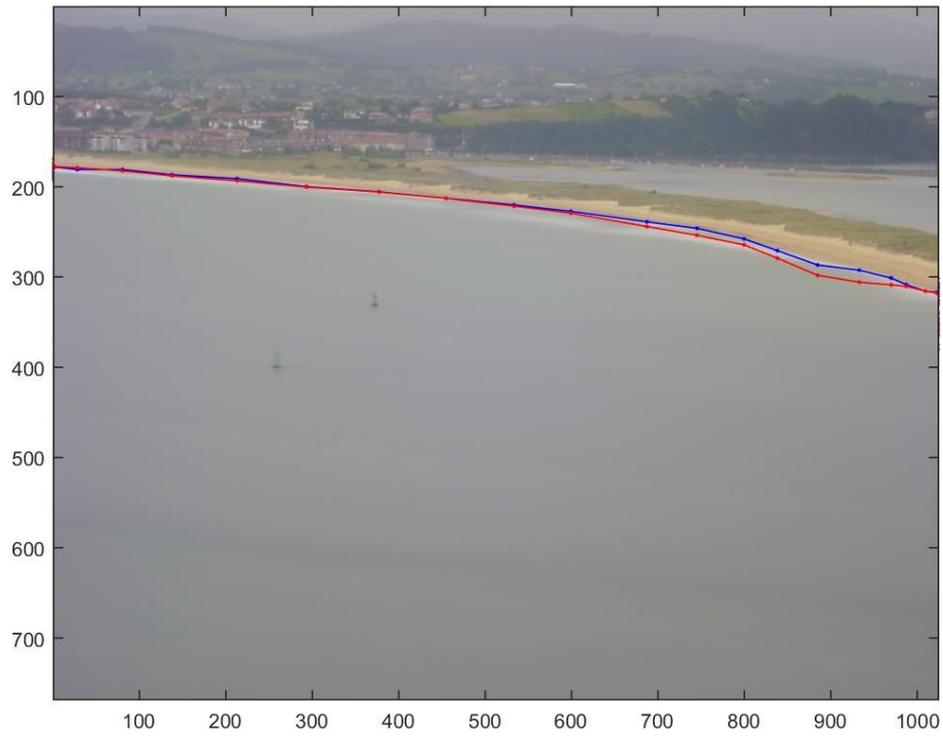
ANEXO 7:

PRECISIÓN DE LA METODOLOGÍA

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos de aplicar la metodología para la detección de línea de costa y representarla junto a la línea de costa digitalizada de forma manual para ver la precisión del modelo.







ANEXO 8:

DETECCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA MEDIANTE LA METODOLOGÍA EN EL SARDINERO

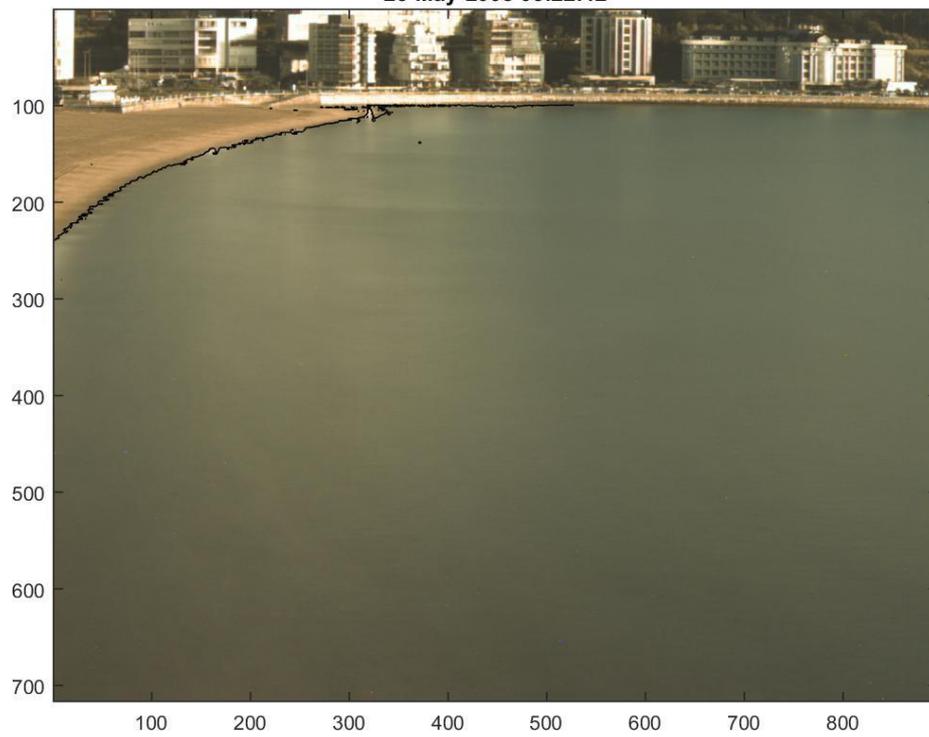
Se muestran los resultados obtenidos de aplicar la metodología en el Sardinero.



20-Sep-2007 06:24:15



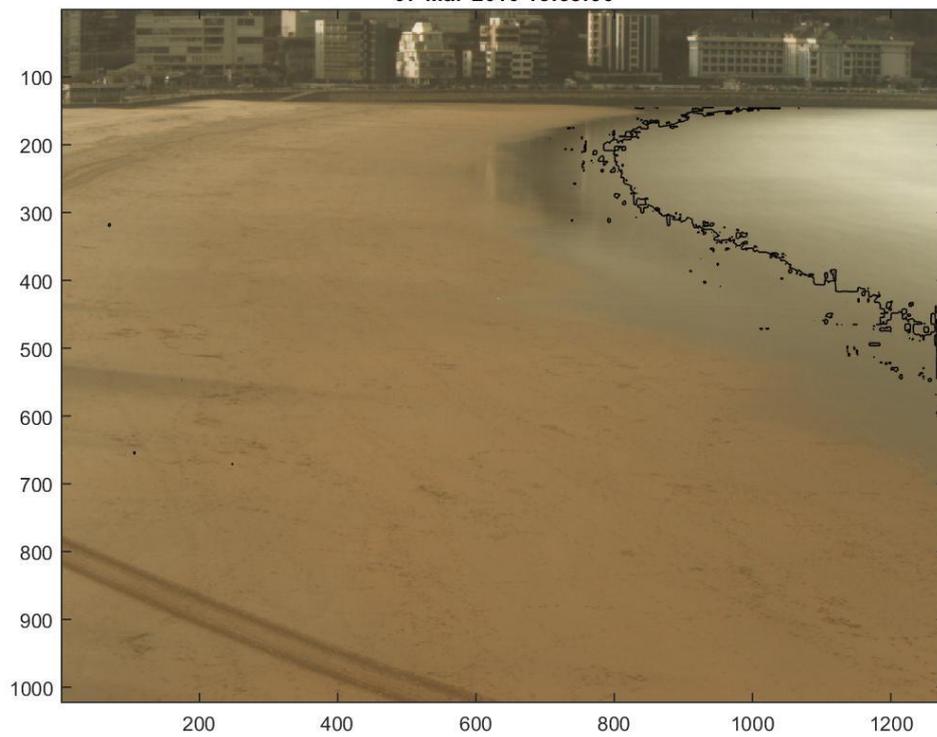
25-May-2008 05:22:12



25-May-2008 08:01:03



07-Mar-2010 15:58:36

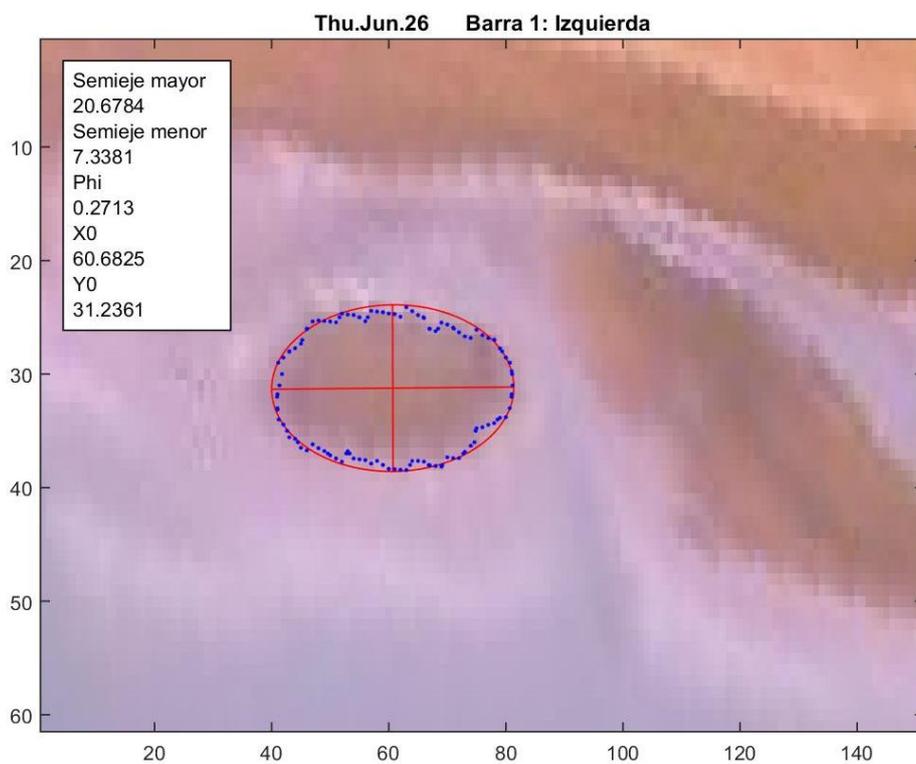
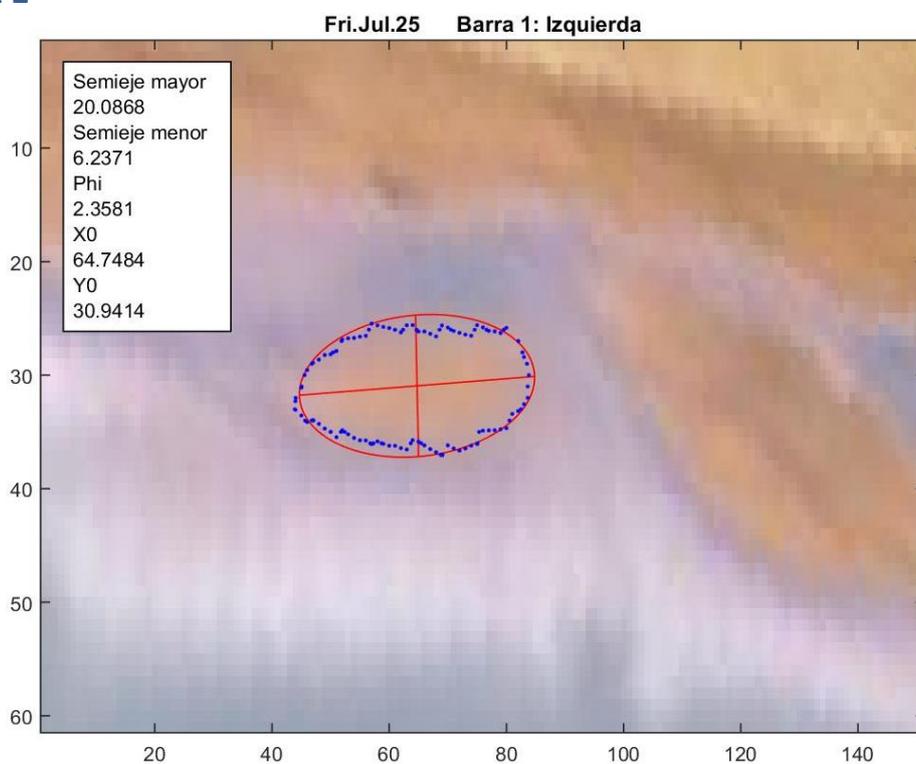


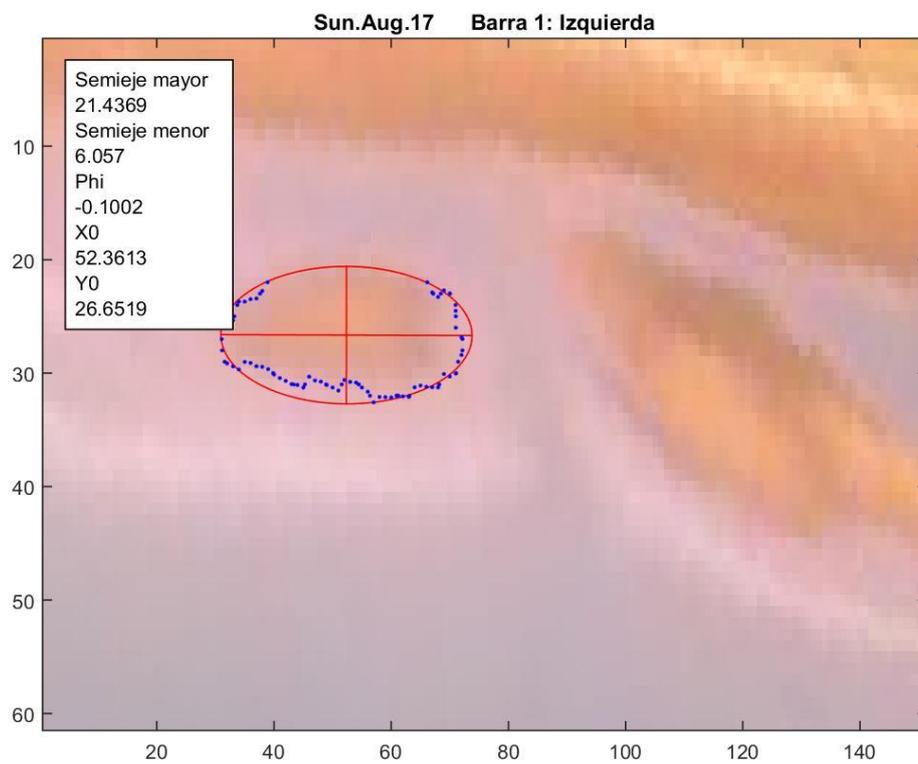
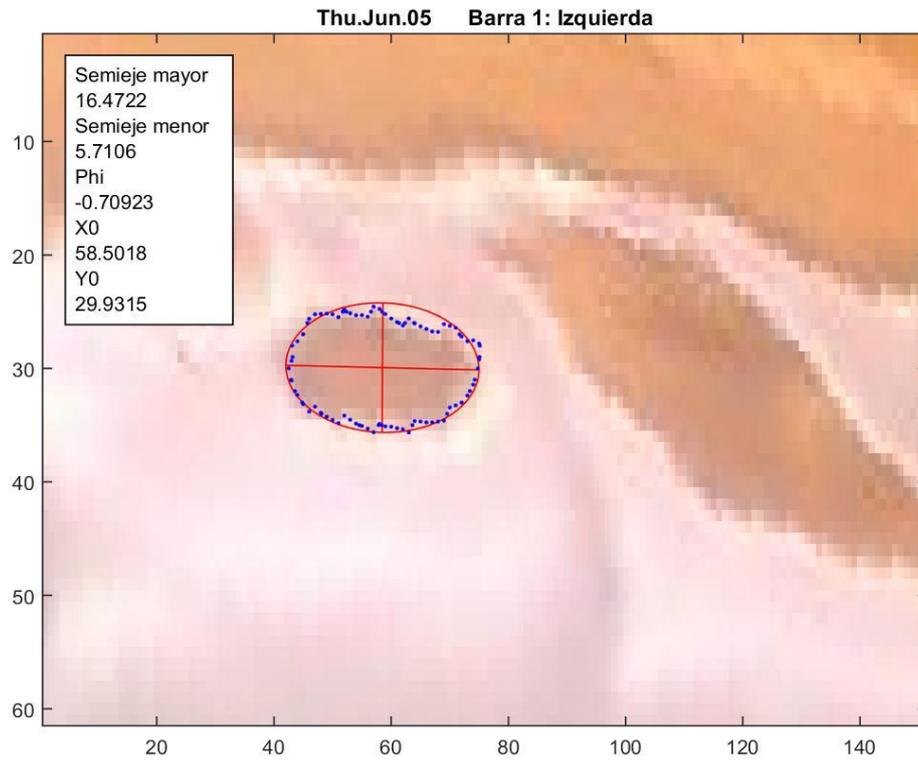
ANEXO 9:

**DETECCIÓN DE LAS BARRAS Y PARAMETRIZACIÓN
MEDIANTE ELIPSES**

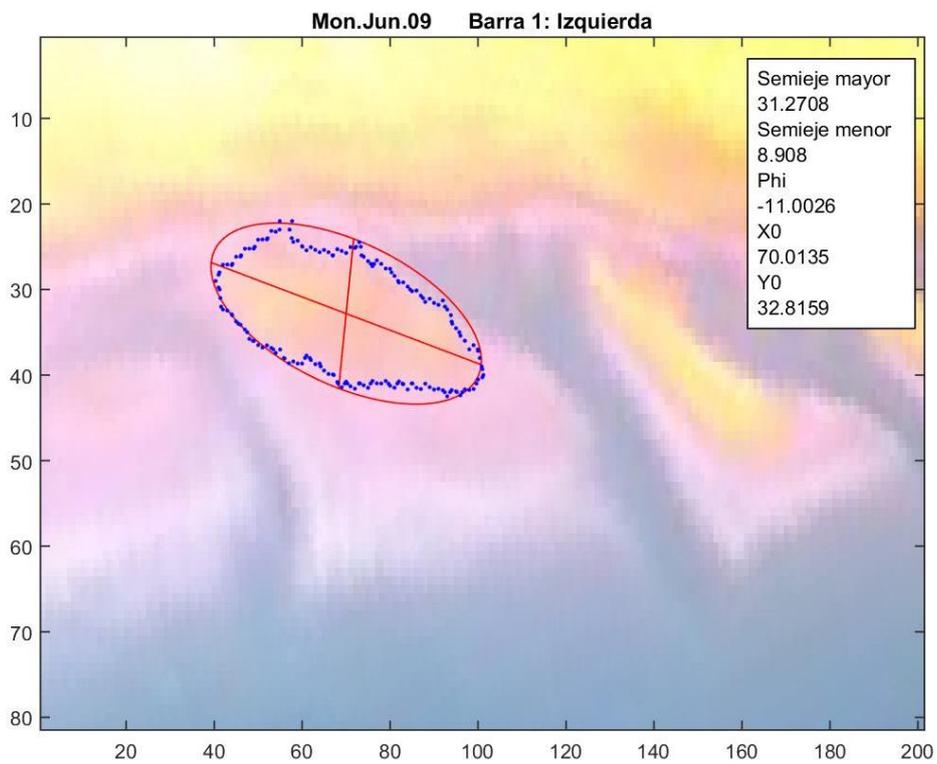
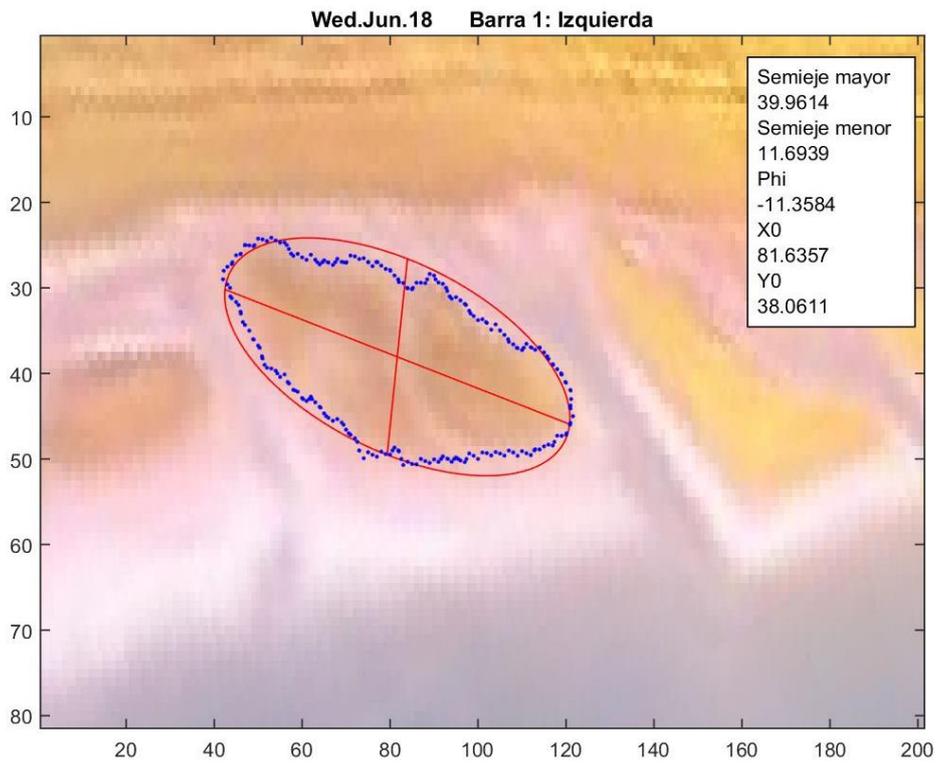
En el presente anexo se muestran los resultados de la detección de las barras aplicando la metodología (línea azul) y el ajuste mediante elipses de las mismas (líneas rojas). En el recuadro se muestran los resultados de la parametrización en la que se indican los valores de los semiejes, orientación de la barra y la coordenada del centro de la elipse.

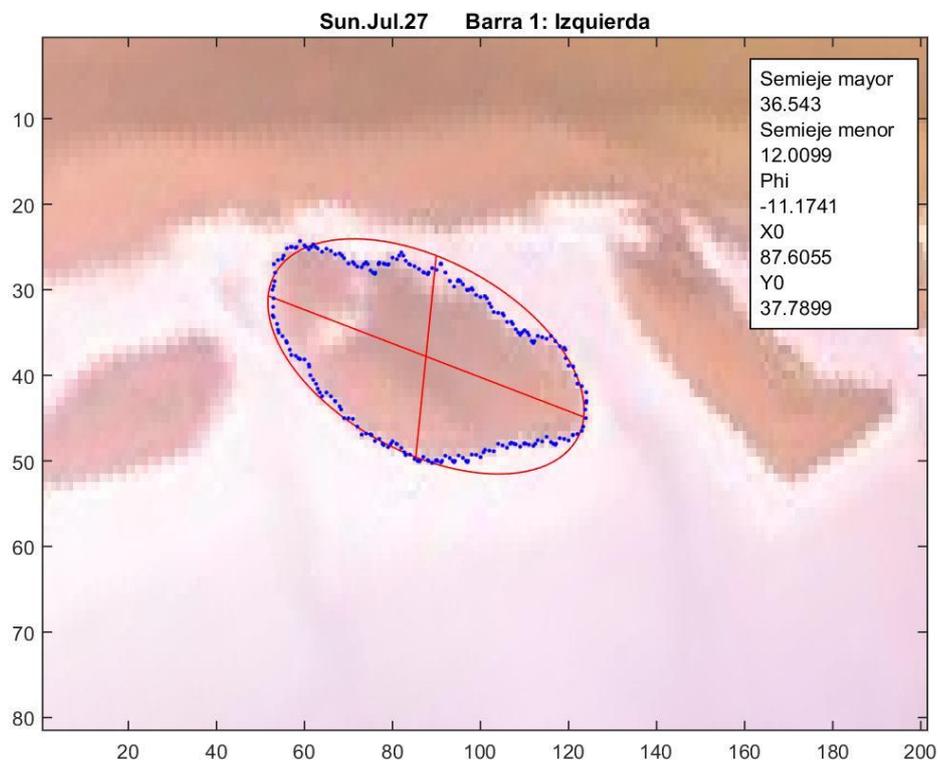
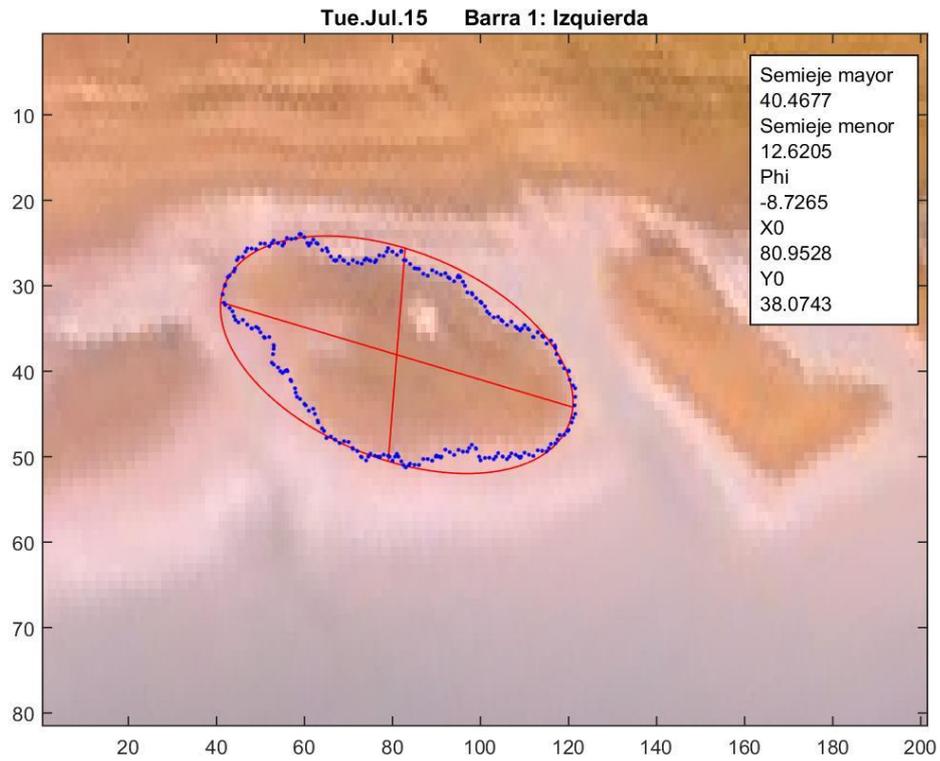
BARRA 1





BARRA 2





BARRA 3

