

CASO PRÁCTICO

Explotación científica de productos PAZ en tareas de vigilancia y monitorización costera

Jarabo Amores, M.P.^{*1}, González Bonilla, M.J.², De la Mata Moya, D.¹, Martín de Nicolás Presa J.¹, del Rey Maestre, N.¹, Bárcena Humanes, J.L.¹, Peláez Sánchez, V.M.¹

¹ *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, 28805 Madrid, España.*

² *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Torrejón de Ardoz, 28850 Madrid, España.*

Resumen: La misión PAZ surge ante la necesidad de un satélite SAR español que pueda proporcionar productos imagen radar para usuarios de seguridad y defensa, civiles y científicos. INTA es el responsable de la dirección técnica del Segmento Terreno, así como del desarrollo y operación del Centro de Calibración y Validación y de la Explotación Científica. Dentro de este ámbito de explotación, se desarrolla un demostrador de aplicaciones SAR marítimas (DeMSAR) como herramienta robusta capaz de llevar a cabo tareas de detección sobre la superficie marina, empleando las imágenes adquiridas por radares de apertura sintética. Se desarrolla bajo un marco de colaboración entre el INTA y la Universidad de Alcalá con el fin de convertirse en un demostrador de las capacidades de los sistemas aerotransportados de INTA y, en el futuro, para procesar los datos adquiridos por el sensor PAZ. Con capacidad de operar en modo automático de detección de barcos o mediante librerías de procesado SAR, DeMSAR ofrece una gran versatilidad al usuario en tareas de procesado tales como filtrado de ruido *speckle*, detección de líneas de costa, estimación de máscaras de tierra y detección y caracterización de barcos.

Palabras clave: SAR, speckle, segmentación, detección de barcos, aplicaciones marítimas.

Scientific exploitation of PAZ products in coastal surveillance and monitoring tasks

Abstract: PAZ mission appears due to the need of a Spanish SAR satellite able to provide radar image products for security and defense, civil and scientific users. INTA is responsible for the technical direction of the Ground Segment, as well as the development of the Calibration and Validation Centre and the scientific exploitation. The 'Demonstrator of Maritime SAR Applications' is proposed as an answer to detection tasks in maritime synthetic aperture radar imagery, which are not completely solved yet. DeMSAR has been developed in the framework of a contract between the Spanish National Institute for Aerospace Technology (INTA) and the University of Alcalá. It is intended to be used as a demonstrator of the capabilities of the airborne SAR prototypes of INTA as well as for PAZ, the Spanish SAR satellite. With two operation modes, an automatic ship detector and a toolboxes mode, DeMSAR offers the user a high flexibility in SAR data processing tasks such as speckle filtering, coastline detection, land mask estimation and ship detection and characterization.

Key words: SAR, speckle, segmentation, ship detection, maritime applications.

* Autor para la correspondencia: mpilar.jarabo@uah.es

1. Introducción

La misión PAZ, parte del Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite (PNOTS), es una misión gubernamental española, basada en un satélite SAR y su correspondiente Segmento Terreno, que proporcionará productos imagen radar para usuarios de seguridad y defensa, civiles y científicos. Su lanzamiento está previsto para 2015. PAZ está siendo desarrollado en un contexto español, siendo INTA el responsable del Segmento Terreno e HISDESAT del Segmento Espacio. El satélite PAZ estará equipado con un instrumento SAR en banda-X sobre una plataforma recurrente a TerraSAR-X.

INTA es el responsable de la dirección técnica del Segmento Terreno de PAZ, que está siendo desarrollado por un conjunto de empresas españolas (INDRA, GMV, DEIMOS, ISDEFE), por la Agencia Espacial Alemana (DLR) y por el propio INTA. Asimismo es responsable del desarrollo y operación del Centro de Calibración y Validación de PAZ así como de la Explotación Científica de la misión PAZ. Esta última se lleva a cabo bajo las premisas establecidas en el artículo 3 del Estatuto del INTA (REAL DECRETO 88/2001), cubriendo específicamente aquellas relacionadas con el propósito y funciones en investigación científica y tecnológica, definición de objetivos, programas y proyectos, propuestas para investigación y desarrollo tecnológicos, cooperación con organismos nacionales e internacionales, diseminación de conocimiento científico y tecnológico y soporte técnico a las administraciones públicas y empresas.

Dentro de ese marco de actuación, uno de los objetivos de uso científico de PAZ es la obtención de demostradores basados en investigación que permitan probar las capacidades de la tecnología SAR en aplicaciones específicas, siendo DeMSAR un ejemplo de este tipo de desarrollos.

El proyecto DeMSAR, nace con el objetivo de desarrollar una herramienta robusta para la extracción de información de imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) marítimas (estimación de máscara de tierra, detección de barcos). DeMSAR se ha desarrollado bajo un marco de colaboración entre el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la Universidad de Alcalá, con el objetivo de ser empleado como demostrador de las capacidades de los sistemas SAR aerotransportados desarrollados

por INTA y, en un futuro, para procesar los productos del sensor PAZ.

2. Modos de adquisición

El sistema PAZ puede trabajar en cuatro modos de adquisición de datos, proporcionando productos con las siguientes características:

- *Stripmap*: Resolución de hasta 3 metros. Cobertura de producto: 30 km × 50 km (rango × acimut). Polarización single {HH,VV} y dual {HH/VV, HH/HV, VV/VH}.
- *ScanSAR*: Resolución de hasta 18 metros. Cobertura de producto: 100 km x 150 km (rango x acimut). Polarización single {HH,VV}.
- *Spotlight*: Resolución de hasta 2 metros. Cobertura de producto: 10 km × 10 km (rango × acimut). Polarización single {HH,VV} y dual HH/VV.
- *High Resolution Spotlight*: Resolución de hasta 1 metro. Cobertura de producto: 10 km × 5 km (rango × acimut). Polarización single {HH,VV} y dual HH/VV.

3. Productos disponibles

Los productos imagen operacionales a disposición de los usuarios tendrán un procesado de nivel L1B, existiendo cuatro niveles de procesado distintos:

- *SSC - Single Look Slant Range Complex*. Producto de un único look, con datos imagen en formato complejo, conteniendo información de amplitud y fase. No disponible para adquisición de imagen ScanSAR.
- *MGD - Multi Look Ground Range Detected*. Producto de múltiples looks, detectado (en amplitud) con celdas de resolución cuadrada y *speckle* reducido.
- *GEC - Geocoded Ellipsoid Corrected*. Producto con múltiples looks, detectado, muestreado y proyectado en el elipsoide de referencia WGS84, asumiendo altura promedio.
- *EEC - Enhanced Ellipsoid Corrected*. Producto ortorectificado, con múltiples looks y con compensación por DEM de las distorsiones por elevación del terreno.

El procesador es un desarrollo de DLR integrado en el Segmento Terreno; el formato de los productos L1B conserva la estructura de los productos de TSX - TDX, permitiendo compatibilidad entre las aplicaciones efectuadas sobre productos de estas misiones. El producto L1B está organizado en una estructura de directorios conteniendo, además del producto imagen, anotaciones adicionales organizadas en ficheros xml, así como otros ficheros auxiliares necesarios para el posterior tratamiento de los productos imagen PAZ.

La obtención de productos en la misión PAZ está conducida por las peticiones de los usuarios que entran al sistema y que se clasifican en tres tipos:

- Peticiones de adquisición de productos,
- Peticiones de procesamiento de productos,
- Peticiones de diseminación de productos.

En las peticiones de adquisición el usuario selecciona el área de interés y fecha aproximada de adquisición de datos, así como el modo de imagen de funcionamiento del instrumento (*Stripmap*, *ScanSAR*, *Spotlight* y/o *High Resolution Spotlight*) y el nivel de procesamiento del producto deseado (SSC, MGD, GEC o EEC).

Los datos brutos SAR adquiridos y descargados en la estación terrena son procesados sistemáticamente a nivel L0 (*raw data* más metadatos asociados), mientras que el siguiente nivel de procesamiento, L1B, se realizará dependiendo de la petición efectuada por el usuario.

Mediante la petición de procesamiento el usuario puede acceder a datos adquiridos por el satélite en el pasado (mediante consulta al catálogo de la misión) y almacenados en el archivo, seleccionando el nivel de procesamiento L1B al que desea sean procesados los datos brutos.

Las peticiones de diseminación permiten al usuario solicitar productos L1B de catálogo correspondientes a adquisiciones pasadas.

4. DeMSAR: Demostrador de aplicaciones SAR marítimas

Ante la creciente necesidad de herramientas que permitan la extracción automática de información en imágenes SAR para su explotación en las diversas áreas definidas por Copernicus, se desarrolló la

aplicación DeMSAR como demostrador de las capacidades de los sistemas SAR aerotransportados desarrollados por INTA y, en un futuro, para procesar los productos del sensor PAZ en aplicaciones relacionadas con las áreas de monitorización marina, seguridad y gestión de emergencias.

Dado que PAZ ha heredado el segmento espacial del sensor TerraSAR-X (DLR) y que el segmento terreno ha buscado la máxima compatibilidad posible, realizando un procesamiento equivalente y teniendo como resultado un formato de producto L1B igual al del TerraSAR-X, la herramienta funciona actualmente con imágenes adquiridas por dicho sensor. DeMSAR, cuya interfaz principal se muestra en la Figura 1, tiene dos modos de funcionamiento: automático y de librerías. En ambos pueden procesarse imágenes completas o sub-imágenes definidas por el usuario. El modo automático implementa un esquema de procesamiento fijo cuyo principal objetivo de diseño ha sido la robustez frente a los diferentes productos SAR y estados de la mar. Debido a la importante variabilidad de las características del mar, este esquema permite la modificación guiada de un conjunto muy limitado de parámetros, con el fin de mantener las capacidades detectoras deseadas en numerosos casos de estudio. En modo de librerías, el usuario puede elegir entre completar un proceso completo de detección de barcos y/o estelas, o bien realizar un procesamiento con el objetivo de realizar un filtrado de *speckle* o estimar la máscara de tierra. En todos los casos, puede definirse el esquema de procesamiento deseado y los algoritmos a emplear en cada una de sus etapas. Estos algoritmos se elegirán de librerías especialmente diseñadas. En concreto, para la detección de barcos, las principales etapas (librerías) de procesamiento que se han implementado son:

- Filtrado de ruido de *speckle*: filtros clásicos y otros más recientes en el procesamiento de imágenes SAR, como el *Mean Shift*.
- Detección de bordes: algoritmos basados en técnicas CFAR (*Constant False Alarm Rate*) y en transformadas como la *Wavelet*.
- Segmentación: técnicas básicas, análisis multi-resolución y *Mean Shift*.
- Detección de barcos: modelo de doble parámetro basado en detección CFAR e incorporación de información contextual para mejorar las prestaciones.

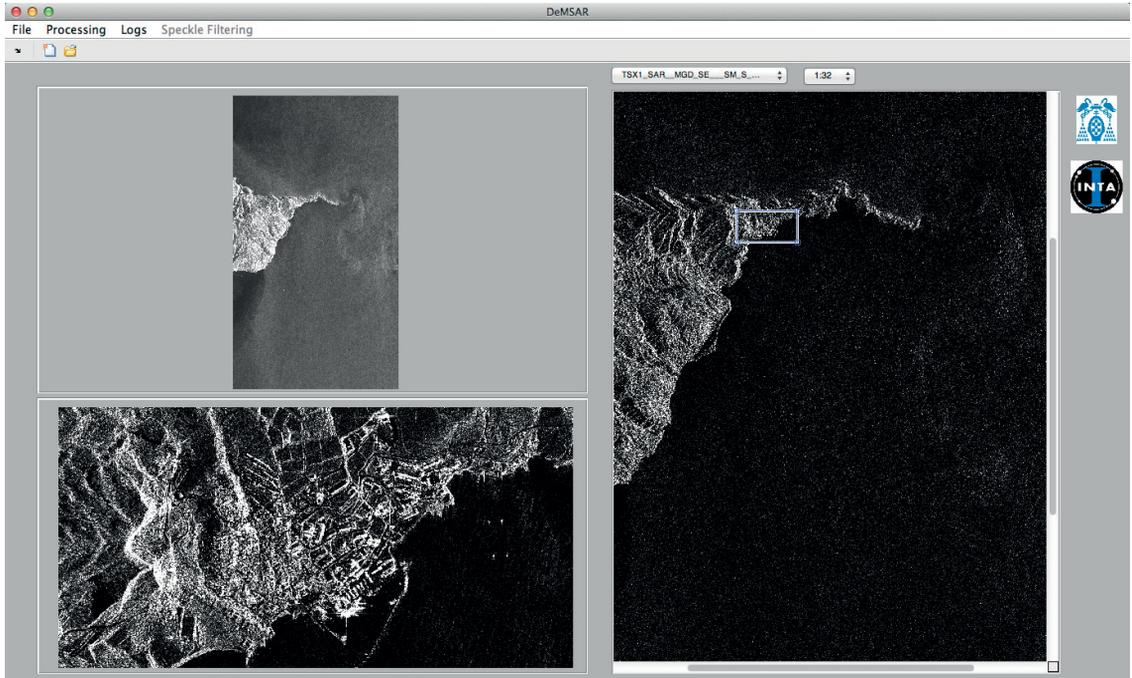


Figura 1. Interfaz principal de DeMSAR. En la ventana de la derecha se muestra la imagen SAR y los productos de procesado; en la ventana superior izquierda se muestra el *quicklook* de la imagen; en la ventana inferior izquierda se muestra un zoom del producto visualizado en la ventana derecha.

- Extracción de características de los barcos detectados: detección de estelas, posición, orientación proa-popa, tamaño.

En las siguientes secciones se detallan las herramientas de procesado que incluye DeMSAR en su modo de operación por librerías.

5. Filtrado de *speckle*

La librería de filtrado de *speckle* incluye varios filtros, algunos de carácter generalista como los filtros de media y mediana, y otros que tienen más en cuenta el modelado del ruido de *speckle*, siempre presente en las imágenes SAR. Entre estos filtros, se presentan algoritmos clásicos tales como el filtro de Lee (Lee, 1980), el filtro de Frost (Frost *et al.*, 1982) y el filtro Gamma (Lopes *et al.*, 1990) y, además, se incluye el filtro Mean-Shift (Fukunaga *et al.*, 1975; Comaniciu *et al.*, 2002), que mediante dos parámetros permite reducir la presencia del ruido al mismo tiempo que respetar las estructuras de la imagen. La interfaz del bloque de filtrado se muestra en la Figura 2.

5.1. Filtro de Lee

El filtro de Lee (Lee, 1980) usa estadísticos locales tales como la media y la desviación estándar dentro de una ventana de procesado de tamaño fijo y lo aplica al píxel central. El principal objetivo es conseguir determinar los pesos adecuados para suavizar la imagen. Además, aproxima el modelo multiplicativo del ruido *speckle* a un modelo lineal, donde se minimiza el error cuadrático medio mediante la estimación de mínimos cuadrados. El algoritmo de filtrado viene dado por la siguiente expresión:

$$\hat{y}_{i,j} = \bar{z}_{i,j} + k_{i,j} \cdot (z_{i,j} - \bar{z}_{i,j}) \quad (1)$$

donde $\hat{y}_{i,j}$ es la estimación de la imagen sin ruido ($y_{i,j}$), $z_{i,j}$ representa el valor de la imagen original ruidosa, $\bar{z}_{i,j}$ es el valor de la media estimada a partir de los píxeles vecinos de la ventana de procesado y $k_{i,j}$ es el parámetro adaptativo que se ajusta para cada píxel según la siguiente regla:

$$k_{i,j} = \frac{\sigma_{z,i,j}^2}{\sigma_{z,i,j}^2 + \sigma_{n,i,j}^2 \cdot \bar{z}_{i,j}^2} \quad (2)$$

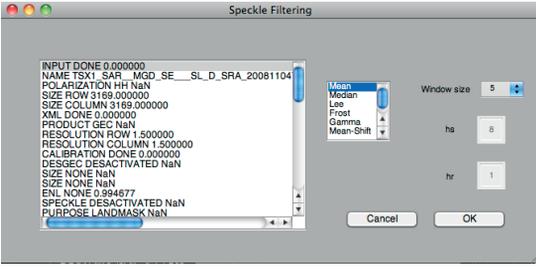


Figura 2. Interfaz de la librería de filtrado de *speckle*.

donde $\sigma_{z_{i,j}}^2$ es la estimación de la varianza de $z_{i,j}$ en la ventana de procesado y $\sigma_{n,i,j}^2$ es la varianza del ruido.

5.2. Filtro de Frost

El filtro de Frost (Frost *et al.*, 1982) emplea un kernel de espiral amortiguado exponencialmente que se adapta a características basadas en estadísticos locales. Consiste en un filtro simétrico circularmente con un conjunto de valores de pesos para cada píxel. Los parámetros del filtro se ajustan según los estadísticos locales, calculados en una ventana centrada en el píxel a filtrar, mediante la convolución de dicha ventana con una respuesta al impulso exponencial dada por:

$$m(t) = \exp(-A \cdot |t|) \quad (3)$$

donde A se calcula como sigue:

$$A = k \cdot \left(\frac{\sigma_{z_{i,j}}^2}{\bar{z}_{i,j}} \right) \quad (4)$$

t es la distancia del píxel central a sus vecinos, k es un factor de amortiguamiento que depende de la imagen sin filtrar y puede requerir experimentos de prueba para determinar su valor, $\sigma_{z_{i,j}}^2$ es la varianza y $\bar{z}_{i,j}$ es el cuadrado del nivel de gris medio dentro de la ventana de filtrado.

5.3. Filtro Gamma

El filtro Gamma se basa en un análisis bayesiano de los estadísticos de la imagen, siguiendo el criterio MAP (máximo *a posteriori*) (Lopes *et al.*, 1990). Asume que tanto la intensidad como el *speckle* siguen una distribución Gamma. La superposición de estas distribuciones da origen a una distribución K que suele utilizarse para modelar una gran variedad

de densidades de sección radar de blancos de tierra y mar. La salida del filtro es la siguiente:

$$\hat{y} = \frac{(\alpha - L - 1) \cdot \bar{y} + \sqrt{\bar{y}^2 (\alpha - L - 1)^2 + 4\alpha L \bar{y}}}{2\alpha} \quad (5)$$

donde

$$\alpha = \frac{L + 1}{L \cdot (\sigma_y / \bar{y})^2 - 1} \quad (6)$$

En el caso de que la salida sea negativa o compleja, se impone que el valor filtrado del píxel sea $\hat{y}_{i,j} = \bar{z}_{i,j}$.

5.4. Mean Shift

El algoritmo *Mean Shift* puede usarse como un filtro no lineal con capacidad de preservar la información de los bordes (Comaniciu *et al.*, 2002), lo que permite que, de entre todos los filtros incluidos, sea el que mejores resultados obtiene, aunque la complejidad del mismo también es mayor.

En una imagen de n píxeles, cada píxel \mathbf{p}_p , $p = 1, \dots, n$, puede expresarse como:

$$\mathbf{p}_p = (\mathbf{p}_{s,p}, p_{r,p}) = (p_{s,x}, p_{s,y}, p_{r,l}) \quad (7)$$

donde $\mathbf{p}_{s,p}$ representa la parte espacial de la información (posición espacial del píxel) y $p_{r,p}$ es la parte de información en rango, que dado que se trabaja con imágenes en escala de gris, esta información será el nivel de gris.

El kernel se define como el producto de dos kernels gaussianos con la misma forma pero diferente ancho de banda, h_s para la parte espacial, expresión (8), y h_r para la parte en rango, expresión (9). Mientras que h_s determina los límites espaciales de la ventana, h_r detecta los bordes de la imagen.

$$g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{j,s} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right) \quad (8)$$

$$g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \quad (9)$$

Para la primera iteración del píxel \mathbf{p}_p , se tiene $\mathbf{z}_1 = (\mathbf{z}_{1,s}, z_{1,r}) = (z_{1,x}, z_{1,y}, z_{1,r}) = (p_{s,x}, p_{s,y}, p_{r,l})$. En la j -ésima iteración, el vector \mathbf{z}_{j+1} se calcula como:

$$z_{x,j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{x,i} \cdot g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \cdot g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{s,j} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \cdot g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{s,j} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right)} \quad (10)$$

$$z_{y,j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{y,i} \cdot g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \cdot g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{s,j} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \cdot g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{s,j} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right)} \quad (11)$$

$$z_{r,j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{r,i} \cdot g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \cdot g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{s,j} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{z_{r,j} - p_{r,i}}{h_r}\right\|^2\right) \cdot g\left(\left\|\frac{\mathbf{z}_{s,j} - \mathbf{p}_{s,i}}{h_s}\right\|^2\right)} \quad (12)$$

donde h_s y h_r son los anchos de banda espacial y en rango, respectivamente, y $g(x)$ es el kernel implementado.

En cada iteración se calcula un nuevo vector $\mathbf{z}_{j+1} = (z_{x,j+1}, z_{y,j+1}, z_{r,j+1})$ y se evalúa la diferencia entre este vector y el obtenido en la iteración anterior (\mathbf{z}_j): $\mathbf{dif}_j = \mathbf{z}_{j+1} - \mathbf{z}_j$. Finalmente, se calcula el valor Mean Shift como:

$$ms_j = \mathbf{dif}_j * \mathbf{dif}_j^T \quad (13)$$

donde \mathbf{T} denota la matriz traspuesta.

El proceso iterativo para cuando la magnitud al cuadrado del vector *Mean Shift* es menor que un umbral dado o cuando se excede el número máximo de iteraciones establecido. Una vez que el proceso ha convergido, la parte de información en rango (el nivel de gris) del píxel bajo estudio, \mathbf{p}_r , se reemplaza por la parte de información en rango de la última iteración del vector \mathbf{z} .

El algoritmo *Mean Shift* puede usarse como un filtro no lineal que preserve los bordes. Si las diferencias entre las intensidades de los píxeles son suficientemente pequeñas como para estar dentro del valor del parámetro en rango (h_r), *Mean Shift* actúa como un filtro paso bajo en la región definida por el parámetro espacial (h_s). En las proximidades de los bordes, las diferencias entre las intensidades son mayores; si fueran tan altas que excedieran el valor del parámetro en rango, la parte en rango de la función gaussiana que se emplea para llevar a cabo el filtrado sería próxima a cero y no se estaría realizando ningún filtrado.

6. Detección de bordes

Dentro de la librería de detección de bordes se incluyen tres detectores con fundamentos diferentes. En primer lugar, el detector de Canny (Canny,

1986), método clásico de detección de bordes sobre imágenes ópticas pero que aquí se emplea sobre imágenes SAR y que está basado en la estimación de gradientes. El segundo detector se basa en la aplicación de una técnica CFAR (Touzi *et al.*, 1988). Por último, se incluye también un detector basado en la transformada *wavelet* (Niedermeier *et al.*, 2000).

6.1. Algoritmo de Canny

El método de Canny (Canny, 1986) se basa en dos criterios que ya se habían empleado anteriormente, la detección y la localización de una determinada clase de bordes y sus correspondientes formas matemáticas del operador de la respuesta al impulso. Canny añade un tercer criterio para asegurar que el detector devuelve una única respuesta para un borde en concreto; se utiliza un criterio de optimización numérica para obtener detectores de bordes en escalón.

Al especializar el análisis en la detección de esos bordes en escalón, se comprueba que hay una cierta incertidumbre en cuanto a la detección y la localización del borde, que son las dos metas principales. De ahí que la aplicación del tercer criterio dé lugar a un detector cuya implementación consiste en considerar como bordes los puntos máximos de la magnitud del gradiente, en una imagen suavizada mediante una función gaussiana.

6.2. Detector de bordes CFAR

Los detectores de bordes típicos que se basan en la diferencia entre los valores de los píxeles pueden ser ineficientes cuando se aplican sobre imágenes SAR. Está demostrado que debido al carácter multiplicativo del ruido *speckle*, estas técnicas detectan un mayor número de falsos bordes en las zonas homogéneas más brillantes (mayor intensidad en el nivel de gris). Es por este motivo que dentro de la librería de detectores de bordes se incluye un detector de bordes CFAR (Touzi *et al.*, 1988), que se basa en el cociente de los valores de los píxeles en lugar de la diferencia.

Dada una ventana de procesamiento de $N \times N$ píxeles, a ambos lados del píxel bajo estudio se determinan dos áreas del mismo tamaño, las cuales no deben superponerse. A continuación, se calcula el cociente, R , de la media de los píxeles de las dos áreas, si se trata de una imagen de intensidad, o de sus

cuadrados, si se trata de una imagen de amplitud. Suponiendo que los píxeles son independientes, la fdp (función de densidad de probabilidad) condicional del cociente R tiene la siguiente expresión:

(14)

$$p(R/P1, P2) = \frac{n\Gamma(2NL)}{\Gamma(NL)^2} \left[\frac{(P1/P2)^{NL}}{(R^n + P1/P2)^{2NL}} \right] R^{nNL-1}$$

$R \in [0, +\infty)$

donde L es el número de looks de la imagen, $P1$ y $P2$ son las potencias medias de las áreas, $n=1$ para imágenes de intensidad y $n=2$ para imágenes de amplitud.

Dadas las consideraciones hechas anteriormente, se puede ver que con tamaños grandes de ventana, el detector es menos sensible al ruido y permite detectar bordes entre áreas de potencias medias muy parecidas. Esto puede convertirse en un problema porque se pueden detectar bordes que no son útiles en la aplicación; será la elección de la P_{fa} (Probabilidad de falsa alarma) la que evite en gran medida la aparición de falsos bordes.

Por otra parte, para poder detectar los bordes más pequeños será necesario emplear un tamaño de ventana pequeño porque si sólo se utilizaran ventanas grandes, la aportación de un borde pequeño no sería importante en el total de la ventana. Por ello, para detectar la mayor cantidad de bordes posible, el detector debe trabajar con varios tamaños de ventana y, con el objetivo de priorizar los bordes pequeños, la ventana crecerá de menor a mayor tamaño.

6.3. Detector de bordes basado en la transformada Wavelet

El tercer método de detección de bordes que incluye la librería es un método basado en la transformada *wavelet* (Niedermeier *et al.*, 2000). Dado que los bordes de una imagen pueden ser definidos matemáticamente como singularidades locales, cabe la posibilidad de aplicar transformadas matemáticas especializadas en la detección de dichas singularidades. Durante mucho tiempo, el método más importante para realizar el análisis de las singularidades ha sido la transformada de Fourier, sin embargo, presenta un problema y es que es de carácter global y, por tanto, no se adapta bien a las singularidades locales. La transformada *Wavelet*, en cambio, realiza un análisis local, especialmente adecuado para el análisis tiempo-frecuencia que

es esencial en la detección de singularidades. Esto hace que sea un método muy adecuado para detectar bordes. La idea básica es similar a la empleada por Canny. Mientras que el detector de Canny emplea una función gaussiana como función de suavizado, el detector basado en *wavelets* escoge una función *wavelet* como la derivada de la función de suavizado. La función de suavizado, $\theta(x,y)$, debe cumplir que su integral sea igual a 1 y que converja a 0 en el infinito. Mallat sugiere emplear como funciones para detectar bordes aquéllas que tengan un único punto de desvanecimiento (Mallat, 2008). La función más simple que cumple todo lo anterior es la función gaussiana, que desempeñará el papel de la función de suavizado:

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \tag{15}$$

Por tanto, las dos funciones *wavelet* que se emplearán serán las derivadas en cada dimensión de esta función de suavizado:

$$\psi_1(x, y) = \frac{\partial\theta}{\partial x} = -\frac{x}{2\pi\sigma^4} \cdot e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \tag{16}$$

$$\psi_2(x, y) = \frac{\partial\theta}{\partial y} = -\frac{y}{2\pi\sigma^4} \cdot e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \tag{17}$$

Para un valor de $\sigma=2$, la función *wavelet* en x se representa en la Figura 3.

En la Figura 4 se muestra el interfaz que incluye la selección del detector de bordes, junto con las demás librerías necesarias para llevar a cabo la estimación de máscara de tierra en imágenes SAR costeras.

7. Segmentación

La librería de métodos de segmentación incluye dos algoritmos de clusterización, *K-means* (Duda, 1973) y *Mean Shift* (Jarabo-Amores *et al.*, 2011), y un algoritmo multiresolución.

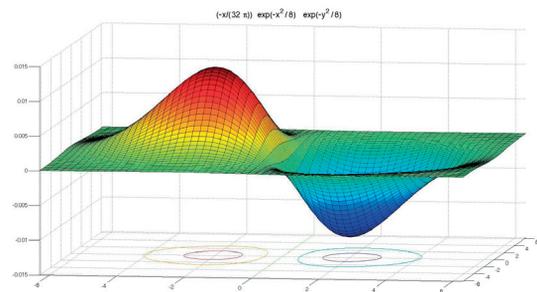


Figura 3. Función wavelet en x para $\sigma=2$.

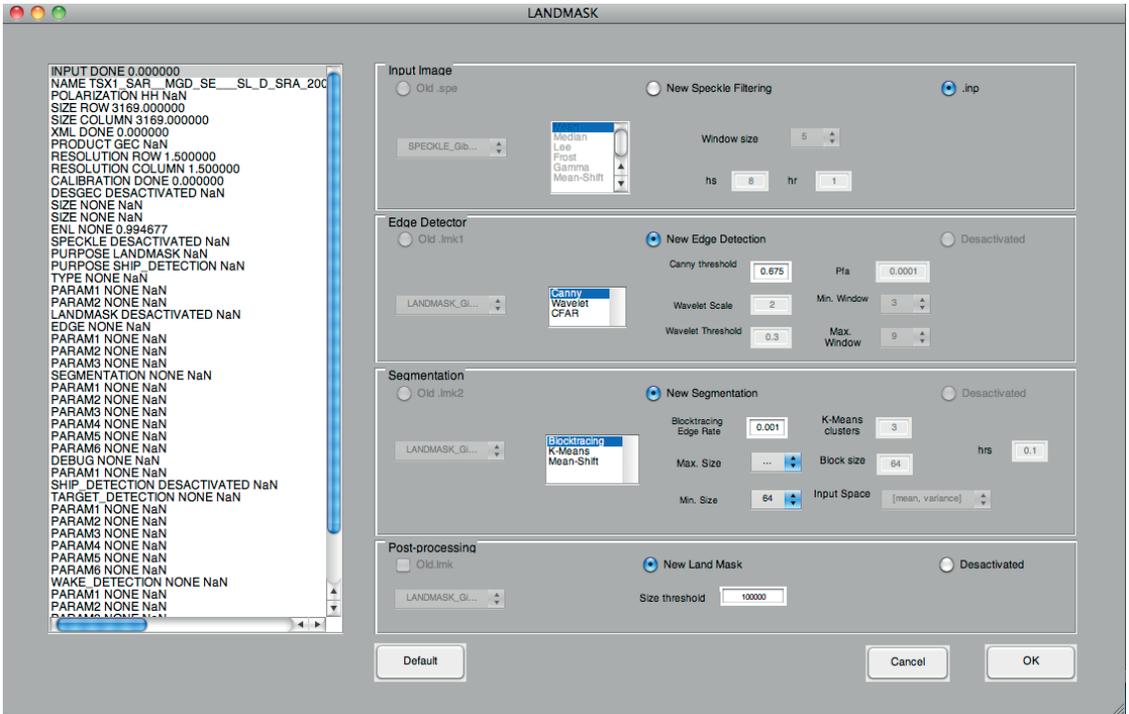


Figura 4. Interfaz del bloque de estimación de máscara de tierra que incluye las librerías de detección de bordes y de segmentación.

7.1. K-means

K-means es un algoritmo de clusterización clásico que consiste en calcular los centroides de los clusters, respondiendo a distintos criterios de mínima distancia. Se ofrece la posibilidad de elegir entre tres conjuntos de entrada: nivel de gris a nivel de píxel, un vector de los niveles de gris asociados a los píxeles contenidos en bloques y un vector que defina el histograma de los píxeles contenidos en bloques.

7.2. Mean Shift

En segundo lugar se incluye una técnica de segmentación basada en el método *Mean-Shift* (Jarabo et al., 2011). Esta técnica está formada por los siguientes pasos:

1. La imagen $I(\mathbf{p}_s)$, donde \mathbf{p}_s indica la posición del píxel, se filtra obteniendo la imagen filtrada $F(\mathbf{p}_s)$ y el mapa de convergencia $M(\mathbf{p}_s)$. En dicho mapa, los ceros representan los bordes detectados, los unos las áreas homogéneas y los valores mayores pertenecen a los contornos de los bordes.

2. Se aplica un primer nivel de clusterización a los píxeles pertenecientes al conjunto de contornos de los bordes. Para ello se define el parámetro h_{rs} , que establece la distancia máxima entre un píxel y el centroide de la clase a la que debe pertenecer.
3. Se genera el mapa de contornos $\mathbf{B}(\mathbf{p}_s)$, donde los píxeles de los contornos toman el valor de la clase a la que pertenecen y el resto de la imagen es igual a 0.
4. Se aplica el algoritmo de clusterización del siguiente vecino más cercano al resto de píxeles de la imagen, asignándoles el valor de la clase más cercana.
5. Se aplica un algoritmo de podado para reducir el número de regiones espúreas.

7.3. Algoritmo multirresolución

Por último, se incluye una técnica de segmentación basada en análisis multirresolución. Primero, la imagen se divide en bloques de un determinado tamaño y todos aquellos en los que el detector de

bordes no detecte ningún borde se clasifican como agua. A continuación, todo bloque adyacente a los previamente clasificados como agua se selecciona y se mide el porcentaje de bordes contenidos en ellos y si es inferior a un determinado umbral, se clasifica también como agua. Cuando no quedan más bloques adyacentes que cumplan la condición anterior, se reduce la dimensión del bloque a la mitad en cada dirección y vuelve a repetirse el proceso.

8. Detección y caracterización de barcos

La última librería de procesado está formada por un detector de barcos basado en detección CFAR, el método de doble parámetro (Chen *et al.*, 2005). Es habitual el empleo de algoritmos de umbral adaptativo para llevar a cabo la detección de barcos en imágenes SAR. El objetivo de estos algoritmos es la localización de píxeles excepcionalmente brillantes comparado con los que les rodean y emplean valores estadísticos de éstos para determinar el valor del umbral.

Se definen tres regiones concéntricas para establecer el detector CFAR (Figura 5). La región interior es el área de blanco, la región intermedia es el área de guarda y la región exterior es el área de fondo. La existencia del área de guarda radica en la necesidad de separar las áreas de blanco y de fondo con el fin de que en el área de fondo no aparezca parte del barco a detectar y, de este modo, poder llevar a cabo una mejor estimación de los parámetros estadísticos de la superficie marina.

Para caracterizar estadísticamente la superficie marina se emplean diferentes modelos estadísticos: distribución gaussiana, distribución Hankel, distribución gamma, entre otras. En esta herramienta se supone la distribución gaussiana, habitualmente

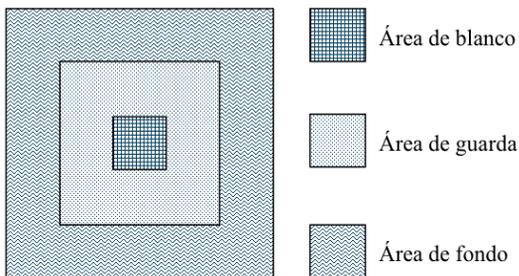


Figura 5. Ventanas del detector CFAR de doble parámetro.

considerada porque el teorema central del límite establece que la media de un conjunto de variables aleatorias idénticamente distribuidas tiende a seguir una distribución gaussiana. Teniendo en cuenta esta distribución, el modelo de doble parámetro se define como sigue:

$$\mu_t > \mu_b + \sigma_b t \tag{18}$$

donde μ_t es la media del área de blanco, μ_b es la media del área de fondo, σ_b es la desviación estándar del área de fondo y t es un parámetro de diseño del detector, que controla la tasa de falsa alarma.

Junto a este detector, la librería incluye otras funciones para caracterizar los barcos detectados, entre las que se encuentra un detector de estelas. Para llevar a cabo esta detección se emplea un método cuya base es la transformada Radón (Mata-Moya *et al.*, 2010). En la Figura 6 se muestra el interfaz necesario para realizar la detección de barcos y la caracterización de los mismos.

9. Caso de estudio: detección de barcos mediante librerías

A continuación se van a mostrar los resultados intermedios y finales en el caso de una detección de barcos llevado a cabo mediante el método de procesado por librerías. La imagen SAR seleccionada (Figura 7) corresponde a la zona del puerto de Algeciras y Gibraltar, cuya imagen óptica también se muestra (Figura 8), y tiene las siguientes características:

- Sensor: TerraSAR-X
- Tipo de producto: MGD/SE
- Modo de adquisición: *Spotlight*
- Polarización: HH
- Resolución: 3,1 m × 3,5 m

Para realizar la detección de barcos se ha decidido seguir el esquema que se describe a continuación y cuya ventana de entrada de parámetros se muestra en la Figura 6:

- Filtrado de *speckle*: aunque no es estrictamente necesario incluir esta etapa, gracias a la robustez frente al *speckle* de las técnicas de detección de bordes y segmentación incluidas en la herramienta, para este caso de estudio se implementa un filtrado con *Mean Shift*. Los valores elegidos

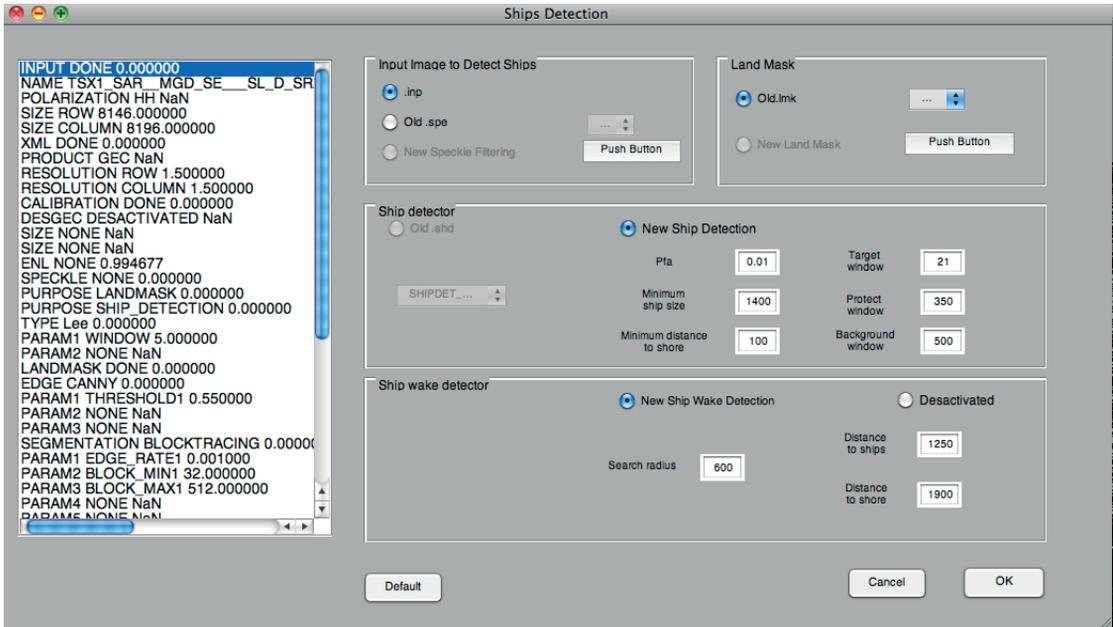


Figura 6. Interfaz del bloque de detección de barcos.

para los parámetros de filtrado son: $h_s=4$ y $h_r=0,5$. El resultado se muestra en la Figura 9.

- Detección de bordes: se escoge el método de Canny por su simplicidad y velocidad. En este caso, donde el objetivo final es la detección de barcos y no la estimación de la línea de costa, la función del detector de bordes es la de servir

como etapa previa a la estimación de la máscara de tierra. Por este motivo, los parámetros del detector se escogen para lograr que haya un número importante de bordes detectados en las regiones terrestres y, en cambio, el menor número posible de bordes detectados en las regiones

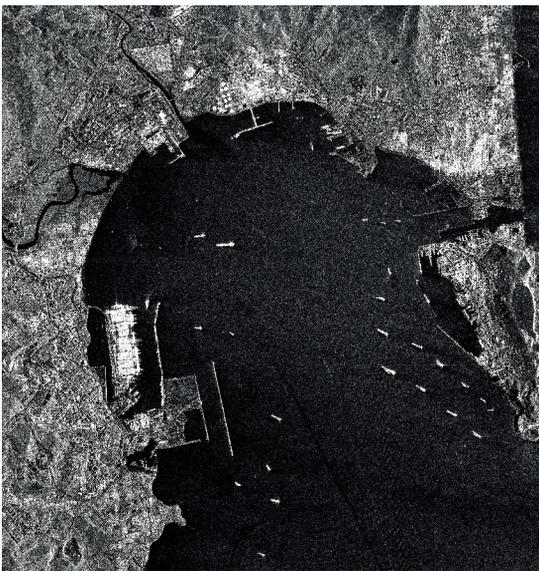


Figura 7. Imagen SAR original de Algeciras y Gibraltar.



Figura 8. Imagen óptica de la región de Algeciras y Gibraltar.



Figura 9. Imagen SAR filtrada con Mean Shift.



Figura 10. Bordes detectados con el algoritmo de Canny sobre la imagen SAR de Algeciras y Gibraltar.

marinas (Figura 10). El parámetro empleado tiene un valor de 0,675.

- Segmentación: como técnica de estimación de máscara de tierra se escoge el algoritmo multiresolución, obteniendo la imagen donde aplicar la detección de barcos final (Figura 11).
- Detección de barcos: deben definirse las dimensiones de las tres áreas concéntricas. Éstas deben ser tales que permitan que el área de blanco se ajuste al tamaño de los barcos (sin que haya presencia de agua) y que el área de fondo sólo contenga agua, para hacer una estimación del *clutter* marino. La comparación ponderada entre estadísticos de la región de blanco y la región de fondo permitirá tomar la decisión entre presencia o ausencia de blanco. En la detección que se presenta se elige un tamaño de 20×20 píxeles para el área de blanco, 350×350 píxeles para el área de guarda y 500×500 píxeles para el área de fondo. Junto a estos valores, el tamaño mínimo y máximo de detección, la probabilidad de falsa alarma y la distancia mínima a tierra son parámetros configurables por parte del usuario.

El resultado, mostrado en las Figuras 12 y 13, demuestra que todos los barcos de tamaño medio y grande son detectados con los parámetros escogidos. Tan sólo se localiza una falsa alarma debida a una estructura metálica junto a Algeciras. Se pone como condición que los barcos detectados deben



Figura 11. Máscara de tierra obtenida mediante la aplicación de la técnica multiresolución sobre la imagen de bordes.

estar a una cierta distancia de la costa, por lo que los barcos dentro del puerto no son detectados. Además, se realiza una estimación del tamaño, la posición en coordenadas y, si existe estela, la orientación, que se muestra en una ventana adjunta cuando se selecciona cada barco detectado con el ratón.

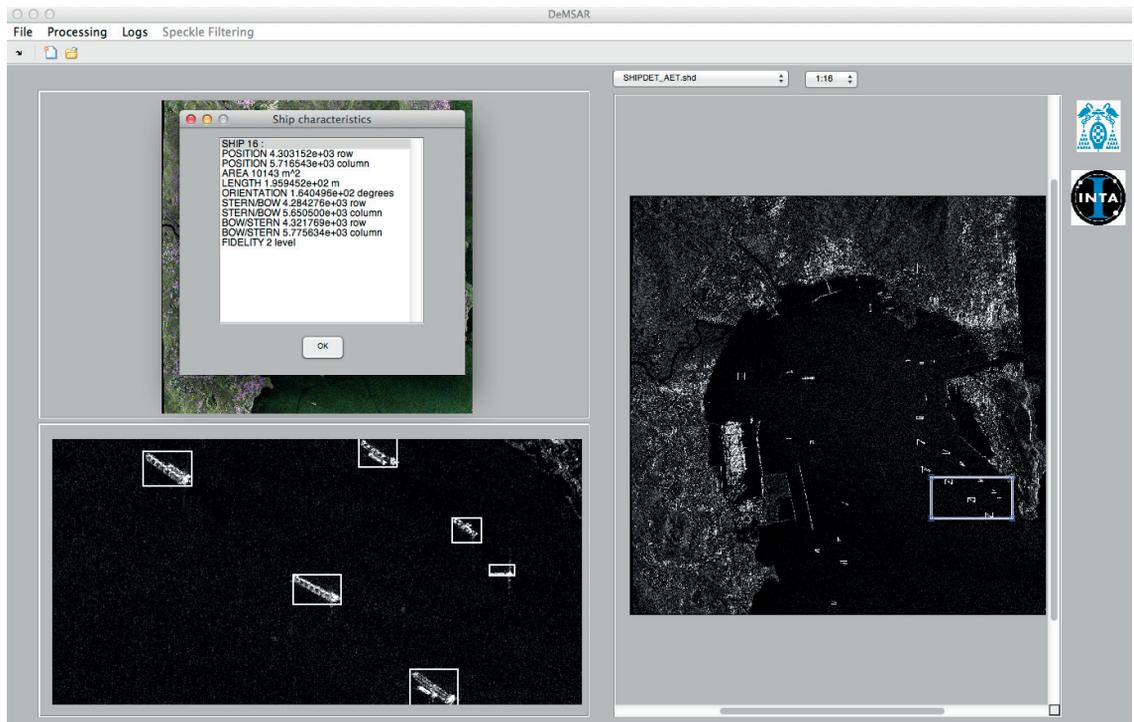


Figura 12. Detección de barcos y características de un barco en concreto.

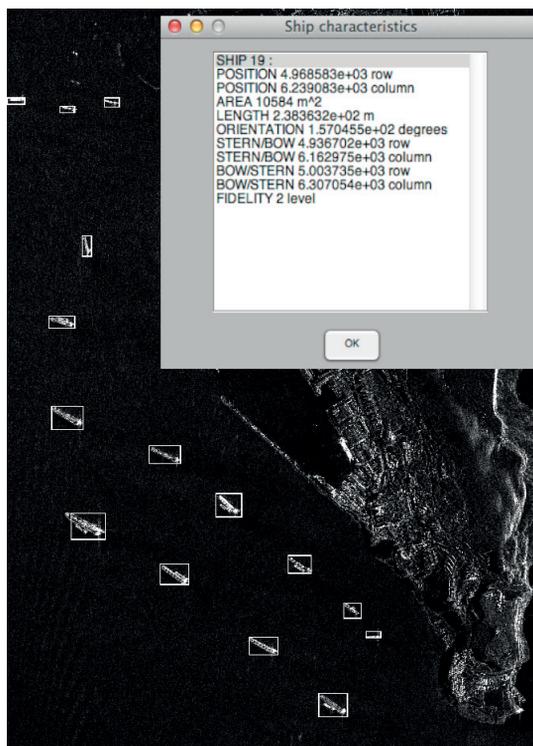


Figura 13. Detalle del resultado de la detección de barcos.

Referencias

- Canny, J., 1986. A computational approach to edge detection, *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intel.*, PAMI-8(6), 679-698. doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851
- Chen, P., Huang, W., Yang, J., Fu, B., Lou, X., Shi, A., 2005. Comparison of ship detection algorithms in spaceborne SAR imagery, *IEEE IGARSS'05*, 3, 1750-1752. doi:10.1109/IGARSS.2005.1526341
- Comaniciu, D., Meer, P., 2002. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intel.*, 24(5), 603-618. doi:10.1109/34.1000236
- Duda, R.O., Hart, P.E., 1973. Pattern classification and scene analysis. Wiley, New York.
- Frost, V.S., Stiles, J.A., Shanmugan, K.S., Holtzman, J., 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intel.*, PAMI-4(2), 157-166. doi:10.1109/TPAMI.1982.4767223
- Fukunaga, K., Hostetler, L., 1975. The estimation of the gradient of a density function, with applications in pattern recognition. *IEEE Transactions on Information Theory*, 21(1), 32-40. doi:10.1109/TIT.1975.1055330

- Jarabo-Amores, P., Rosa-Zurera, M., de la Mata-Moya, D., Vicen-Bueno, R., Maldonado-Bascon, S., 2011. Spatial-Range Mean-Shift Filtering and Segmentation Applied to SAR Images, *IEEE Trans. on Instrum. and Measurement*. 60(2), 584-597. doi:10.1109/TIM.2010.2052478
- Lee, J.S., 1980. Digital Image Enhancement and noise filtering by use of local statistics, *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intel.*, PAMI-2(2), 165-168. doi:10.1109/TPAMI.1980.4766994
- Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., Laur, H., 1990. Maximum *a posteriori* speckle filtering and first order texture models in SAR images, *IGARSS'90*, Washington D.C., Estados Unidos, 2409-2412. doi:10.1109/IGARSS.1990.689026
- Mallat, S., 2008. A wavelet tour of signal processing. 3rd Edition. Academic Press.
- Mata-Moya, D. Jarabo-Amores, P., Jiménez-Chaparro, B., Martín de Nicolás-Presa, J., Nieto-Borge, J.C., 2010. Application of Mean-Shift filtering to ship wakes detection in SAR images, *8th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, Alemania.
- Niedermeier, A., Romaneessen, E., Lehner, S., 2000. Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods, *IEEE Trans. on Geosc. Remote Sensing*, 38(5), 2270-2281. doi:10.1109/36.868884
- Touzi, R., Lopes, A., Bousquet, P., 1988. A statistical and geometrical edge detector for SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(6), 764-773. doi:10.1109/36.7708