

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA ZONA CIEGA DE UN SLAR

Beatriz Alacid¹, Damián Mira¹, Pablo Gil², Fernando Torres²

⁽¹⁾ Instituto Universitario de Investigación Informática,

⁽²⁾ Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal,
Universidad de Alicante.

{bea.alacid, damian.mira, pablo.gil, fernando.torres}@ua.es

Resumen

Este artículo presenta una metodología para la detección y medida de la zona ciega de un sensor embarcado en aeronave del tipo SLAR. La zona ciega de un SLAR está formada por la región donde hay ausencia de medida o los datos están enmascarados con errores significativos. El objetivo que se busca es detectar esta región, delimitarla y etiquetarla, para reducir las regiones de búsqueda a ROIs específicos, y así, simplificar los procesamientos necesarios para detecciones de otros objetivos, como manchas de hidrocarburos o embarcaciones.

Palabras Clave: SLAR, sensores activos, vigilancia marítima, detección.

1 INTRODUCCIÓN

La proliferación de embarcaciones debido al transporte de personas y mercancías, así como la constante expansión de plataformas petrolíferas obliga hoy más que nunca a realizar exhaustivos controles marítimos con un doble objetivo. Por un lado, con un objetivo disuasorio que permita proteger y evitar todo tipo de accidentes o malas prácticas marítimas como los vertidos de hidrocarburos o limpieza de tanques. Y por otro lado, disponer de los medios y mecanismos para detectar y monitorizar estos vertidos en caso de que se produzca.

Actualmente la Unión Europea trabaja para llevar a cabo un sistema de vigilancia marítimo integrado [7], junto con todos sus estados miembros, para mejorar los sistemas de búsqueda y rescate, mejorar la seguridad de la Unión y reducir la contaminación marítima. Para realizar estas tareas se usa la información proveniente de sensores de distinta naturaleza y con distintas ubicaciones, tales como: sensores en tierra (radares de posición, radares de alta frecuencia para el control de mareas, etc.), embarcados (SLAR, FLIR, transpondedores, etc.) y sensores en satélites (SAR, meteorológicos, etc.).

En la actualidad, una de las corrientes de investigación consiste en la búsqueda y detección automática de manchas de hidrocarburos (petróleo, fuel y algunos de sus derivados), ya sean éstos producidos por vertidos ilegales de embarcaciones o de forma accidental, por roturas o pérdidas en el casco de las embarcaciones o refinerías marítimas. Hasta la fecha, la gran mayoría de estudios y técnicas han estado basados en el análisis de señales procedentes de sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Estos sensores por su diseño, modo de funcionamiento y características están generalmente situados integrados en satélites a gran altura (773 Km en el caso del Envisat, actualmente fuera de servicio y 798 Km en el caso del RADARSAT2) [17].

El uso de sensores SAR aplicados a la detección de vertidos se ha extendido gracias a las características que ofrecen de invariancia a gran cantidad de condiciones climáticas, ya sea de día o de noche e independientemente de si el área está o no cubierta por nubes. No obstante, los sensores SAR también tienen problemas de detección en ciertas condiciones, tales como: baja velocidad del viento que azota la superficie marina [4], presencia de capas de hielo flotante [3] o presencia de grandes acumulaciones de plancton marino [2] entre los más destacables.

En los últimos años, y gracias a los avances científicos y tecnológicos, han aparecido nuevos sensores conocidos como SLAR (*Side-Looking Airborne Radar*) que se basan en SAR pero cuyas características de reducido volumen, peso y de adquisición de señal les ha permitido ser montados en aeronaves tripuladas. La principal ventaja de SLAR es la de estar embarcado y por lo tanto tiene la posibilidad de registrar datos en cualquier momento y lugar, como en el caso reciente del hundimiento del buque *Oleg Noydenov* 15 millas al sur de Punta Maspalomas (Gran Canaria) [10]. Mientras que en SAR de satélite es necesario que la señal esté barriendo el lugar en el momento en el que se produce el vertido, sin dejar pasar mucho tiempo para que se disperse o volatilice la mancha. Además por lo general los satélites con SAR montan gran cantidad de sensores adicionales [6].

Tanto para llevar a cabo los protocolos de actuación desde un punto de vista de limpieza o para ejecutar sanciones es importante que transcurra el menor tiempo posible entre que se produce el vertido y éste es detectado y localizado. De ahí, la importancia de la tecnología SLAR.

En la actualidad, la tecnología SLAR se usa bajo control y supervisión humana, para identificar y discriminar entre lo que es un área en la imagen que representa una mancha de hidrocarburo y lo que no lo es aunque se le parezca morfológicamente. A veces, es posible que se produzcan, falsos positivos (o 'look-a-like' en la terminología especializada) es decir falsas identificaciones como manchas en imagen provocadas por bancos de poseidoneas, algas, etc. Esta tarea de supervisión, se lleva a cabo por los operadores especializados de vuelo que se encargan de procesar manualmente la información de la señal SLAR con herramientas informáticas de análisis específicas. En la última década, son varios los estudios que han estado orientados a buscar mecanismos de automatización de los procesos de detección que simplifiquen la tarea de los operadores y les ayuden a la toma de decisiones, reduciendo el número de datos a analizar en los procesos de detección.

También, recientemente, se están implementando métodos para la predicción y seguimiento de las trayectorias de estos vertidos; bien para identificar las mareas y reducir la contaminación en las costas, o para a partir de análisis 'big data' determinar si la trayectoria de barcos y del movimiento de la marea negra coinciden en algún punto del lecho marítimo en el tiempo. En este campo se encuentran muchos estudios que son devenidos a partir del hundimiento de la embarcación *Prestige* en las costas gallegas [13, 14] y de prácticas ilegales de limpieza de depósitos en alta mar.

El emplazamiento geográfico del estado español, así como sus aproximadamente 7880 km de costa determinan que la investigación en estos campos se oriente tanto a la detección y seguimiento de vertidos de hidrocarburos como al control de embarcaciones para su identificación y seguimiento de trayectorias. Dentro de estos estudios destaca el uso de imágenes SAR obtenidas a través de los satélites para la detección automática de embarcaciones [9] y para la clasificación de las embarcaciones detectadas [11]. Internacionalmente, los estudios también se centran en estos mismos campos. Así, Robla, Gasull y Mera presentan varios estudios para la detección, seguimiento predictivo a partir de SAR, en la costa cantábrica, costa catalana y costa gallega [16, 8, 12], respectivamente. Otros investigadores, como Valencia han llevado a cabo estudios similares haciendo uso de imágenes GNSS-R (Global

Navigation Satellite System's signals) para la detección de manchas [18], o estudios como los de Abascal para determinar las trayectorias de las manchas de vertidos en función del movimiento de corrientes marinas haciendo uso de radares de alta frecuencia [1].

Este artículo se estructura de la siguiente manera, en la sección 2 se muestra el funcionamiento de la tecnología SLAR. En la sección 3, se muestran y discuten dos aproximaciones para realizar la detección de la zona ciega del SLAR. Los resultados experimentales se muestran en la sección 4 y finalmente en la sección 5 se comentan algunas conclusiones de este trabajo en actual desarrollo.

2 SISTEMA SENSORIAL EMBARCADO

El sistema sensorial empleado en este trabajo se basa en tecnología SLAR embarcada en aeronaves tripuladas (Figura 1).

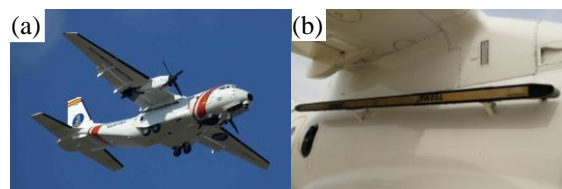


Figura 1: (a) Aeronave con sensores SLAR, imagen cortesía de Salvamento Marítimo <http://www.salvamentomaritimo.es>. (b) Detalle del sensor SLAR instalado.

En el funcionamiento del sensor SLAR es posible identificar dos zonas: la zona de barrido y la zona ciega. La zona de barrido viene determinada por el ángulo de apertura del radar y éste dependerá de la altura de la aeronave, h . Como se puede observar en la Figura 2a-b, la zona de barrido viene delimitada por el rango cercano y el rango lejano. Las aeronaves montan dos antenas SLAR (estribor y babor), generándose una zona de medidas no validas (zona ciega). Cualquier vertido que se localizase dentro de esa zona ciega sería de difícil detección y la probabilidad de confundirlo con ruido o *look-a-like* es muy alta. La ecuación (1) muestra la resolución de acimut de una antena SLAR, porción de terreno escaneado en un instante de tiempo en sentido de la línea de vuelo, donde h es la altura del radar, l su longitud de la antena, λ es la longitud de onda de los impulsos, siendo θ el ángulo de incidencia sobre el lecho marino.

$$R_a = \frac{h\lambda}{l \sin\theta} \quad (1)$$

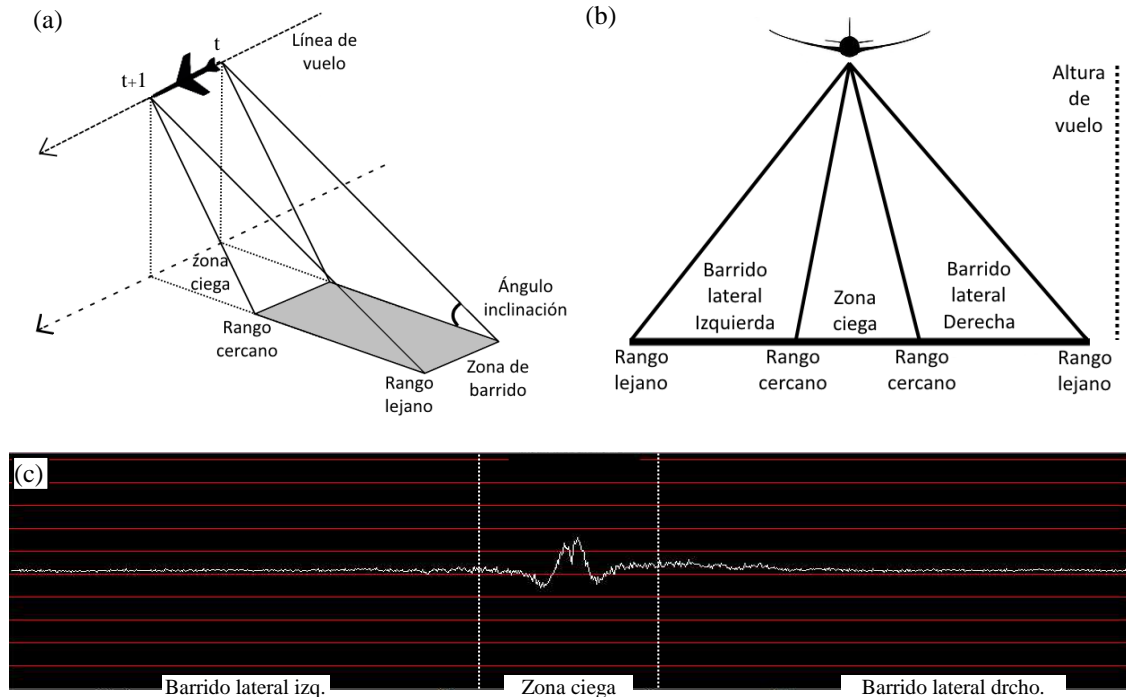


Figura 2: (a) Esquema del funcionamiento de un sensor SLAR. (b) Regiones de barrido del sensor. (c) Señal real en bruto de un instante de tiempo dado (t) del sensor de la Figura 1.

Además, si se visualiza la señal en bruto del sensor en un instante de tiempo en un área marina sin perturbaciones (no hay objetivo que detectar), se puede observar una variación en la lectura que afecta a la zona ciega. Esto demuestra la inviabilidad de los datos que conciernen dicha zona (Figura 2c).

El análisis y procesado de datos de un sensor SLAR se puede llevar a bajo nivel, desde un punto de vista de tratamiento de la señal que se registra en un instante de tiempo dado (Figura 2c), o bien a alto nivel generando una imagen digital en el que se representa en forma de píxeles cada uno de los barridos de la señal entre dos instantes de tiempo distintos (ver Figura 4).

El método presentado en este trabajo resulta novedoso dado que es capaz de detectar la zona ciega del sensor SLAR mediante algoritmos de visión. Además, no hay trabajos conocidos que realicen este tipo de procesamiento.

3 MÉTODO DE DETECCIÓN

En las imágenes digitales generadas a partir de los barridos de un sensor SLAR, se consideran regiones no procesables y no deseables a todas aquellas que representan el haz de la trayectoria de vuelo de la aeronave (Figuras 2.a y 2.b). La zona de haz del avión determina la zona ciega del SLAR. Ésta se caracteriza por delimitar un área en imagen en la que

los datos registrados tienen errores importantes de medida, por lo que éstos no deben ser considerados en procesos de análisis y detección. Por ello, cabe destacar la importancia de identificar dicha zona ciega que puede variar en función de las condiciones de vuelo de la aeronave; principalmente altitud y giros de ésta. En este trabajo no se han considerado los giros ni cambios de altitud. Por ello, las imágenes que se han empleado han sido capturadas en condiciones de vuelo estable. Actualmente, se está trabajando en la mejora del algoritmo con el fin de que dichos aspectos no interfieran en la detección. Puesto que un giro se representa como una zona ciega adicional perpendicular a la procesada en este trabajo. Por el contrario, en cambios de altitud la anchura de la zona ciega se ve afectada, aumentando o disminuyendo, dando como resultado en la detección a rectas convergentes en un punto durante la maniobra de cambio de altitud de vuelo.

El método que se presenta en este trabajo tiene como objetivo la detección de la zona ciega de SLAR en condiciones operativas de vuelo con el fin de delimitar este área para no realizar tareas de procesamiento de imagen en los píxeles que la forman y de este modo evitar falsos positivos y falsas medidas de parametrización en los procesos de imagen posteriores que se apliquen. De tal modo que el procesado de las imágenes sea lo más óptimo posible. Es decir, únicamente se tienen en cuenta las partes de la imagen que son representativas o válidas

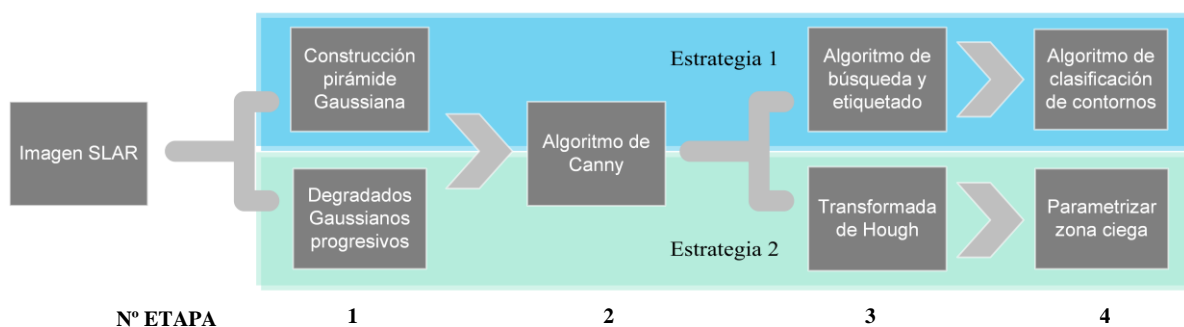


Figura 3: Métodos empleados para la detección de la zona ciega SLAR.

como regiones de búsqueda para análisis y detección de manchas, embarcaciones y otros objetivos futuros.

Las imágenes digitales han sido generadas a partir de los datos del SLAR embarcado (Figura 1.b) en un avión EADS CASA CN-235/300 propiedad de SASEMAR (Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima) y operado por INAER Helicópteros S.A.U. Estas imágenes se procesan tal y como las facilita el sistema SLAR sin ningún tipo de filtro o procesado previo a bajo nivel. Cabe destacar que la zona ciega del SLAR en la imagen, no suele ser fija (estar localizada en el mismo sitio en la imagen y tener la misma anchura), por lo que puede variar su posición de representación en la imagen, así como sus dimensiones. Esto se debe a las diferentes maniobras de vuelo que se pueden llevar a cabo durante la captura de información, como ya se ha mencionado.

Con el fin de resolver este problema que se plantea, se han implementado dos casuísticas, ambas centradas en el estudio y aplicación de algoritmos de procesamiento basados en el estudio de los gradientes de intensidad. A continuación, se comparan ambas y se escoge la más exitosa para ser aplicada en los procesos de detección.

3.1 ESTRATEGIA 1

La estrategia 1 consiste en crear una pirámide de imagen SLAR, es decir, una colección de imágenes a distintas resoluciones. En este caso, se ha realizado una pirámide de Gauss [5] por disminución, de la resolución de la imagen. Y posteriormente, se ha aplicado el algoritmo de Canny para la búsqueda de píxeles de máximo gradiente; con el objetivo de obtener píxeles de borde representativos y lo más robustos posibles. Finalmente, a partir de la imagen binaria obtenida, que representa los píxeles de borde, se ha aplicado un método que detecta y clasifica los contornos en dicha imagen.

3.2 ESTRATEGIA 2

Para esta segunda aproximación se han realizado sobre la imagen, degradados gaussianos progresivos, a los que se les ha aplicado, al igual que en la estrategia anterior, el algoritmo de Canny [5]. El objetivo buscado es obtener píxeles de borde robustos que destaquen de sus vecinos. Como se observa en las imágenes SLAR (Figura 4), la zona ciega del SLAR viene delimitada por cambios bruscos de intensidad que además tienen gradientes de valor y dirección similar, llegando a definir un borde virtual en el lecho marino.

Una vez que se han calculado dichos bordes, para obtener únicamente aquellos que identifican la zona ciega buscada, se ha aplicado la transformada de Hough [15] para extraer las líneas rectas verticales orientadas que la delimiten. Por último, en la etapa de parametrización, se mide la anchura de la zona ciega. La zona ciega está formada por líneas que definen el comienzo de barrido del haz del SLAR en el flanco izquierdo y derecho de la aeronave. Dichos perfiles aparecen representados en la imagen SLAR como píxeles de frontera horizontales y verticales, es decir, puntos aproximados por líneas rectas con pendientes aproximadas de 90° o 0° .

4 RESULTADOS

A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos tras la aplicación de las estrategias (descritas en los apartados 3.1 y 3.2) que se han abordado en la identificación de la zona ciega SLAR. En la Figura 4 se observa la imagen SLAR original, a partir de la cual se han realizado los experimentos. Estas imágenes, se capturan en unas condiciones reales de vuelo. En este aspecto, las condiciones de vuelo destacables por su influencia directa en el tipo de imagen SLAR son la altitud y la velocidad de vuelo. La primera se establece aproximadamente entre los 300 y los 1500 metros. Y en cuanto a la velocidad de vuelo, se establece entre los 250km/h y

410km/h. En particular, las Figuras 4.a y 4.b han sido capturadas con una velocidad de 300km/h y 350km/h respectivamente. Y una altitud de 325 metros, en el caso de la Figura 4.a y 1385 metros en la Figura 4.b.

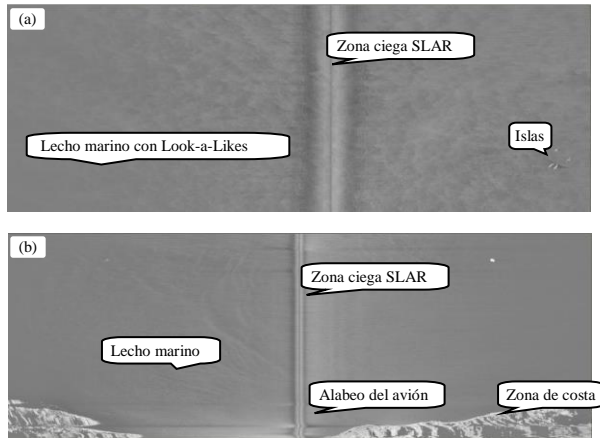


Figura 4: Imágenes capturadas con SLAR.

4.1 EVALUACIÓN DE TIEMPOS DE CÓMPUTO

Durante la experimentación se han evaluado los tiempos de cómputo para cada estrategia. En la Figura 5, se muestra una gráfica con la representación de los tiempos medios registrados por etapa y agrupados por estrategia (ver diagrama de métodos, Figura 3). Como se puede observar la estrategia 1 es computacionalmente más pesada que la estrategia 2.

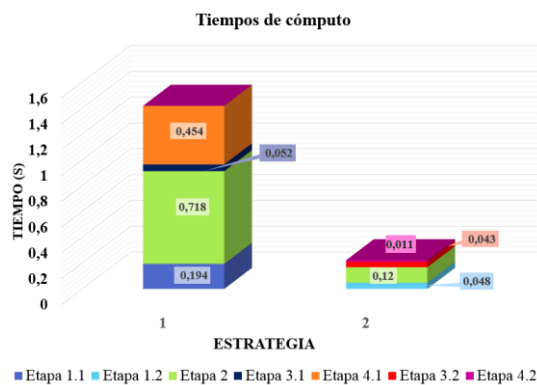


Figura 5: Tiempos de procesamiento por estrategia.

4.2 PRECISIÓN EN LA DETECCIÓN

En relación a la exactitud en la detección de la zona ciega SLAR, en este apartado, se procede a realizar una comparativa entre los resultados obtenidos para las diferentes estrategias abordadas.

En primer lugar se abordan los resultados obtenidos tras la aplicación de la estrategia 1. Cabe destacar que se ha implementado dicha estrategia a partir de una pirámide de 5 niveles. En las Figuras 6 y 7 se muestra el resultado de la detección de píxeles de máximo gradiente de borde piramidalmente. Posteriormente a la imagen resultante, en la etapa 1, se aplica una estrategia para identificar y etiquetar los valores de máximo gradiente en intensidad de grises con supresión de no-máximos. Finalmente, se agrupan éstos por conjuntos mediante técnicas de 'clusterizado'. Así, cada conjunto constituye un contorno o borde con píxeles de magnitud y dirección de gradiente similar, que cumplen unas restricciones de proximidad en la imagen. Para la identificación, se ha implementado un algoritmo de etiquetado que clasifica los contornos por colores en base a su parametrización. En las Figuras 6, 7 y 8 se representa la detección usando la estrategia 1 con imágenes SLAR tomadas en condiciones ambientales distintas.

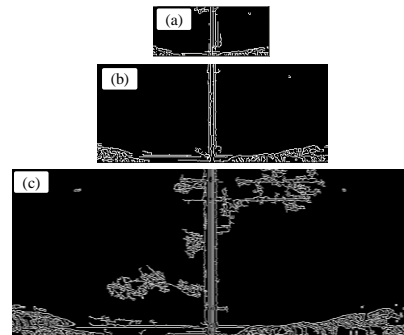


Figura 6: Pirámide resultante tras la aplicación del algoritmo de Canny sobre Figura 4.b. (a), (b) y (c) Niveles 1,3 y 5 respectivamente.

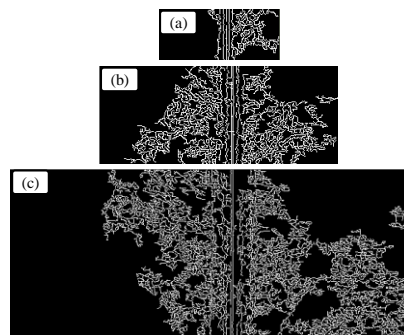


Figura 7: Pirámide de bordes por niveles sobre Figura 4.a. (a) 1 nivel. (b) 3 niveles. (c) 5 niveles.



Figura 8: Detección para la estrategia 1. (a) Resultado procesamiento Figura 4.b. (b) Resultado procesamiento Figura 4.a.

Del mismo modo, se muestran los resultados obtenidos en la experimentación para la estrategia 2 para la misma situación anterior (Figura 9), donde cabe destacar que se han aplicado varios niveles de degradados gaussianos, modificando el tamaño de máscara y manteniendo misma desviación típica. En concreto, para los casos particulares que se muestran en la Figura 9, se ha utilizado una máscara de tamaño 3×3 y $2 \geq \sigma < 3$.

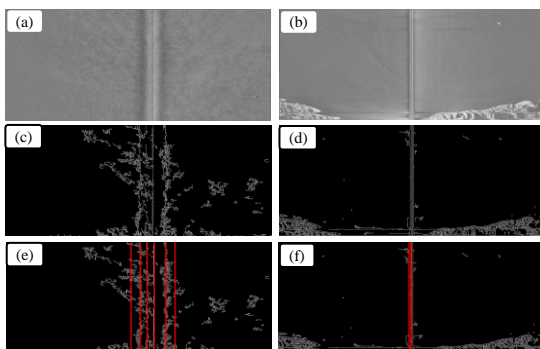


Figura 9: Resultado de la aplicación de la estrategia 2. (a-b) Filtrados Gaussianos. (c-d) Detección de bordes. (e-f) Detección de rectas.

La detección de la zona ciega se obtiene a partir de la ecuación 2, donde ρ determina la distancia de la línea recta (obtenida a partir de la transformada de Hough en la etapa 3.2) con respecto al origen y θ es el ángulo que forma la perpendicular a la recta.

$$\rho_i = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (2)$$

En la ecuación 3 se define la zona ciega SLAR en una imagen en función de la distancia Euclídea de las rectas cuyo $\theta \approx 90^\circ$ entre rectas.

$$\max d_i(\rho_i, \rho_j) \forall i, j \text{ donde } i \neq j \quad (3)$$

A partir de la distribución de distancias ρ y haciendo uso de la media de la muestra y del error estándar, se definen el intervalo de confianza $\bar{\rho} \pm (\sigma \cdot k)$, para eliminar las rectas cuya distancia es un valor atípico, donde k ajusta los cuantiles de error permitidos de manera adaptativa, de acuerdo a los parámetros de viento y vuelo medidos desde la aeronave, en un proceso de calibrado y donde $\bar{\rho}$ es la media y σ la desviación típica de la muestra.

A la vista de estas figuras, se puede concluir que aplicando la estrategia 2 se han obtenido buenos resultados incluso cuando se aplican filtros de suavizado con máscaras grandes. Conviene notar que los filtros de suavizado Gaussiano eliminan no sólo información de ruido y pequeñas imperfecciones sino que también, pueden influir negativamente en ocasiones eliminando definición en contornos. No obstante, es importante remarcar que en las pruebas realizadas los resultados han sido satisfactorios cuando se ha aplicado un filtro de Gaussiana alto. En los resultados de esta segunda estrategia (Figura 10), en la que se aplica un degradado gaussiano más suave, se aprecia que los resultados son parcialmente buenos para casos como el de la Figura 9.a; ya que la detección de la zona ciega SLAR es más afinada empleando la estrategia 2.

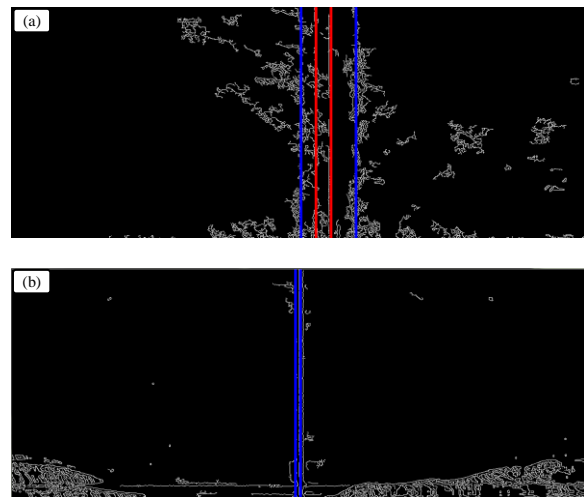


Figura 10: (a-b) Detección de límites de la zona ciega SLAR.

Hasta el momento se ha trabajado con imágenes tomadas en condiciones medioambientales de diferente índole. Entre ellas, los fenómenos meteorológicos como la presencia y velocidad del viento en la zona son quizás, unas de las condiciones medioambientales que más influyen la calidad de las imágenes SLAR; la ausencia de viento o los vientos de intensidad débil favorecen la formación de

zonas oscuras en las imágenes SLAR (*look-a-likes*). Otros fenómenos meteorológicos, oceanográficos y otros relacionados con actividad biológica en la capa superficial del océano, dejan una huella característica en la imagen del sensor que es necesario tener en cuenta. En líneas futuras se contempla la utilización de datos meteoceanográficos y ampliar la detección de otras regiones en la imagen SLAR.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo a los resultados mostrados la zona ciega del avión es obtenida satisfactoriamente. No obstante, cabe destacar la estrategia 2 frente a la primera, ya que computacionalmente es más rápida y más precisa la localización de los límites.

El siguiente objetivo que se persigue es detectar, en las dos zonas de interés obtenidas, ROIs (una a cada lado de la zona ciega), manchas de hidrocarburo originadas por vertidos ilegales, embarcaciones de casco metálico y líneas de costa. Para ello, se está estudiando y trabajando en la actualidad en diferentes técnicas de segmentación y análisis de textura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto (RTC-2014-1863-8) "ONTIME: Operación remota de Transmisión de Información en Misiones de Emergencia" de la Convocatoria Retos de Colaboración del MINECO. Agradecimientos al personal de INAER Helicópteros S.A.U y SASEMAR, especialmente a los operadores de vuelo Pablo Benjumedá y Juan Peña.

Referencias

- [1] Abascal, A. J., Castanedo, S., Fernandez, V., Ferrer, M. I., & Medina, R., (2011). "Oil spill trajectory forecasting and backtracking using surface currents from high-frequency (HF) radar technology". *OCEANS*, pp. 1-8.
- [2] Blondeau-Patissier, D., Gower, J. F., Dekker, A. G., Phinn, S. R., & Brando, V. E., (2014). "A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans". *Progress in oceanography*, vol. 123, pp. 123-144.
- [3] Brekke, C., Holt, B., Jones, C., & Skrunes, S., (2014). "Discrimination of oil spills from newly formed sea ice by synthetic aperture radar". *Remote Sensing of Environment*, vol. 145, pp. 1-14.
- [4] Brekke, C., & Solberg, A. H., (2005). "Oil spill detection by satellite remote sensing". *Remote sensing of environment*, vol. 95(1), pp. 1-13.

[5] Cyganek, B., Siebert, J.P., (2009). An introduction to 3d Computer vision techniques and algorithms, John Wiley & Sons.

[6] Envisat Instruments, recurso on-line:
<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments>

[7] European Integrated maritime surveillance, recurso on-line:
http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/integrated_maritime_surveillance/index_en.htm

[8] Gasull, A., Fabregas, X., Jimenez, J., Marqués, F., Moreno, V., & Herrero, M. A. (2002, September). "Oil spills detection in SAR images using mathematical morphology". *11th European Signal Processing Conference*, pp. 1-4.

[9] Jarabo-Amores, P., González-Bonilla, M. J., Mata-Moya, D., Martín-de-Nicolás, J., & Palma-Vázquez, Á. (2012, July). "Demonstrator of maritime SAR applications: Automatic ship detection results". *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3732-3735.

[10] Manchas hidrocarburos buque Oleg Naydenov:
<http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B1467CCC-6AAA-4772-93C9-69CA19E67E27/130358/150420BuqueOlegNaydenov.pdf>

[11] Margarit, G., Mallorqui, J. J., Rius, J. M., & Sanz-Marcos, J. (2006). "On the usage of GRECOSAR, an orbital polarimetric SAR simulator of complex targets, to vessel classification studies". *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44(12), pp. 3517-3526.

[12] Mera, D., Cotos, J. M., Varela-Pet, J., & Garcia-Pineda, O. (2012). "Adaptive thresholding algorithm based on SAR images and wind data to segment oil spills along the northwest coast of the Iberian Peninsula". *Marine pollution bulletin*, vol. 64(10), pp. 2090-2096.

[13] Mihoub, Z., & Hassini, A. (2014). "Monitoring and identification of marine oil spills using advanced synthetic aperture radar images". *Optica Applicata*, vol. 44(3), pp. 433-449.

[14] Palenzuela, J. T., Vilas, L. G., & Cuadrado, M. S. (2006). "Use of ASAR images to study the evolution of the Prestige oil spill off the Galician coast". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27(10), pp. 1931-1950.

[15] Richard O. Duda and Peter E. Hart. (1972). "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures". *Commun. ACM*, vol. 15(1), pp. 11-15.

[16] Robla, S., Llata, J. R., Torre, C., & Sarabia, E. G. (2009, May). "An approach for tracking oil slicks by using active contours on satellite images". *OCEANS*, pp. 1-8.

[17] Topouzelis, K.N. (2008). "Oil Spill Detection by SAR Images: Dark Formation Detection, Feature Extraction and Classification Algorithms". *Sensors*, vol. 8, pp. 6642-6659.

[18] Valencia, E., Camps, A., Rodriguez-Alvarez, N., Park, H., & Ramos-Perez, I. (2013). "Using GNSS-R imaging of the ocean surface for oil slick detection". *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 6(1), pp. 217-223.