

# Descripción de las Principales Técnicas de Corrección del Moteado y de Evaluación de la Calidad del Desmoteado en Imágenes SAR

Eduardo Vasquez-Dolande<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-4623-0739)

<sup>1</sup> PEDECIBA Geociencias. Universidad de La República. Montevideo, Uruguay

[evasquez@fing.edu.uy](mailto:evasquez@fing.edu.uy)

**Resumen.** Las imágenes obtenidas con Radares de Apertura Sintética (SAR) presentan grandes ventajas con respecto a las capturadas por sensores pasivos, entre las que se destaca la posibilidad de adquirir imágenes independientemente del clima y de la iluminación solar. Estas imágenes son generadas mediante el procesamiento coherente de las señales dispersadas, lo que las hace susceptibles al denominado “*Speckle noise*” o “ruido de moteado”, causando que sea mucho más difícil su interpretación. En este trabajo se presentarán las principales técnicas de filtrado, agrupadas en tres categorías: Métodos Bayesianos en el Dominio Espacial, Métodos Bayesianos en el Dominio Transformado y Métodos No Bayesianos. Dentro de estos se destacan técnicas novedosas que han proporcionado resultados bastante prometedores, como la concordancia de bloques 3D o BM3D y algunas técnicas que involucran la fusión de dos o más algoritmos de filtrado. Se mencionan las premisas que debe cumplir un proceso de desmoteado ideal y la importancia de la generación de imágenes simuladas que permitan evaluar cuantitativamente la calidad del proceso de filtrado. Posteriormente se presentan las principales metodologías para la evaluación de la calidad de una imagen desmoteada, haciendo énfasis en los métodos cuantitativos, que permiten elaborar índices cuyos resultados pueden ser evaluados objetivamente. Finalmente se distinguen aquellos métodos en los cuales se cuenta con la imagen *limpia*, conocidos como métodos *con referencia*, y aquellos en los cuales se evalúan los resultados en función del comportamiento estadístico de las imágenes SAR, denominados métodos *sin referencia*. Se hace especial énfasis en una metodología reciente, denominada “*estimador de proporción- $\alpha\beta$* ”, basado en la imagen de razón o proporción generada por la comparación entre la imagen original y la imagen filtrada. Por último, se presentan algunas reflexiones sobre las técnicas de desmoteado y de evaluación de la calidad de los resultados, destacando las metodologías que se perfilan como las más prometedoras, en las cuales se espera un mayor énfasis en los estudios a ser realizados a futuro.

**Palabras Clave:** Desmoteado, *Speckle*, Radar de Apertura Sintética, SAR, Filtros No Locales, Métodos Bayesianos, Imagen Simulada, Generadores Electromagnéticos SAR, Imagen de Razón, Estimadores de Razón, Evaluación de Calidad.

## I. Introducción

El lanzamiento del Seasat en 1978 marcó el inicio del uso civil de los Radares de Apertura Sintética (SAR, por su sigla en inglés) satelitales [1]. No obstante, el uso de los sensores remotos activos ha estado usualmente restringido a un grupo relativamente pequeño de especialistas. La razón principal de la escasa masificación del uso de imágenes SAR se debe al poco conocimiento del proceso de captura, preprocesamiento y utilización de los datos obtenidos por esta vía y también a la relativamente escasa disponibilidad de los sensores espaciales y aerotransportados que cuentan con dicha tecnología. [2]

El incremento de la constelación de satélites equipados con SAR [3], aunado a la existencia de proyectos que contemplan la libre adquisición de los datos, como es el caso de las misiones Sentinel 1A y 1B de la Agencia Espacial Europea (en operación desde 2014 y 2016, respectivamente), ha motivado a un creciente número de científicos a contemplar el uso de dichos sensores activos para sus investigaciones en distintas ramas del conocimiento [2].

Debido a que las imágenes SAR son adquiridas mediante la captura de múltiples barridos de la señal emitida por el satélite, se requiere efectuar un preprocesamiento de los datos para poder contar con una imagen coherente y georreferenciada [2]. El preprocesamiento de las imágenes SAR no es un tema sencillo de abordar. Uno de los primeros retos que deben asumir quienes trabajan con imágenes SAR consiste en tratar de minimizar el efecto del denominado moteado o "*Speckle*", que ha sido definido como una perturbación granular, y que es usualmente modelada como un ruido multiplicativo y que típicamente afecta a las imágenes SAR [2] asociado a la resolución limitada del sensor y al procesamiento coherente de las señales reflectadas desde múltiples objetivos distribuidos [4].

Existe un número cada vez mayor de técnicas enfocadas a reducir en la medida de lo posible dicho "ruido" [5], [2], [6], tomando en consideración que, al ser ocasionado en gran parte por las características del terreno, aporta información sobre el mismo y por lo tanto no es deseable su supresión total.

En este artículo se hará mención a las principales técnicas de reducción del moteado, desde las más antiguas y utilizadas, hasta técnicas de reciente desarrollo, desafiantes desde el punto de vista de su comprensión pero prometedoras en función de los resultados preliminares. Posteriormente se abordarán las principales técnicas de evaluación de la calidad del proceso de desmoteado y por último se mencionará la utilidad de la simulación

de imágenes SAR como una forma de generar un ambiente de pruebas necesario para la cuantificación de la incertidumbre en los resultados.

## **II. Descripción de las Principales Técnicas de Desmoteado de Imágenes SAR.**

El filtrado del moteado en imágenes SAR representa un área de investigación muy activa principalmente desde principios de la década del 2000 [7]. Existe un número cada vez mayor de aproximaciones o algoritmos para llevar a cabo el proceso de desmoteado de una imagen SAR, y que pueden diferenciarse en función de los resultados obtenidos, los recursos de hardware requeridos para ejecutarse o el enfoque metodológico adoptado por el investigador.

Las técnicas de eliminación del moteado, en teoría, deben permitir la corrección de distintos parámetros de la imagen, pero al mismo tiempo preservar características de la imagen original. De acuerdo con [6], una buena técnica de desmoteado debería cumplir con lo siguiente:

- 1.- Suprimir la mayor parte del moteado en regiones homogéneas.
- 2.- Preservar las texturas.
- 3.- Preservar los límites entre regiones y otras estructuras lineales.
- 4.- Evitar la alteración de dispersores naturales o antrópicos.
- 5.- Evitar introducir “*artifacts*” o alteraciones puntuales en los datos.

Para cumplir con dicha premisa, las técnicas de desmoteado presentan distintos tipos de soluciones o formas de abordar el problema. En [2] se presenta un tipo de clasificación bastante completa en función de los distintos dominios de estimación utilizados en las metodologías desarrolladas. Dicha clasificación contempla las siguientes categorías:

- Los métodos bayesianos en el dominio espacial.
- Los métodos bayesianos en el dominio transformado, que explotan el concepto de “*onda discreta transformada*”.
- Las aproximaciones no bayesianas, que comprenden todas aquellas técnicas de filtrado desarrolladas en los últimos 30 años que no siguen una aproximación bayesiana, como es el caso de los filtros morfológicos y las estadísticas de orden.

Una clasificación similar es la presentada en [5] solo que en este trabajo, las aproximaciones no bayesianas son englobadas dentro de los denominados “*filtros no locales*”, cuyo enfoque principal es la estimación del valor del pixel objetivo en función de pixeles cuidadosamente seleccionados de la escena, tomando en consideración no los más cercanos, sino los más parecidos por contar con la misma señal subyacente. A continuación, se presenta una descripción de las principales técnicas de desmoteado de cada una las tres categorías mencionadas.

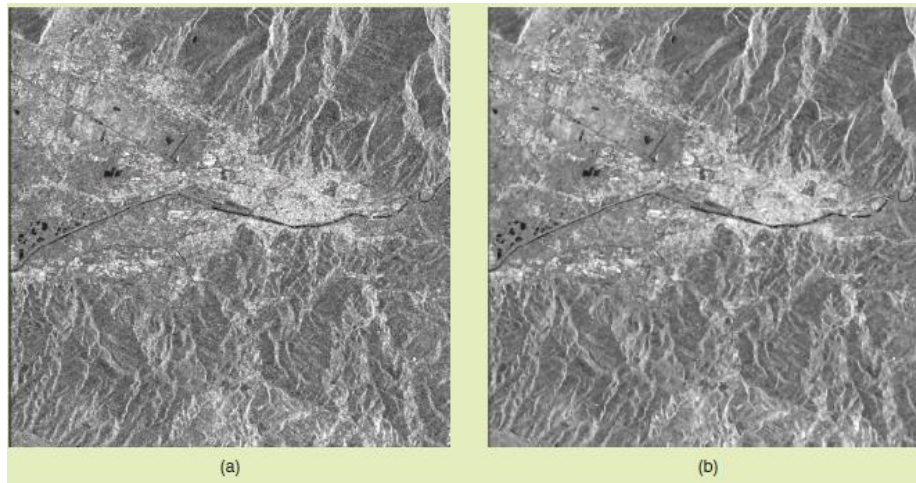
#### A. Métodos Bayesianos en el Dominio Espacial.

Comprenden un conjunto de técnicas obtenidas asumiendo ciertas hipótesis sobre las propiedades estadísticas de la reflectividad y el moteado, como la función de distribución de probabilidad y la autocorrelación espacial. Los tres principales filtros de este método son:

1. **Filtro de Lee:** también llamado “*filtro de estadísticas locales*” [2], fue introducido por Jong-Sen Lee en 1980 [8] y es reconocido como el primer filtro basado en un modelo [2], y por ser uno de los más utilizados y citado por la comunidad científica [6]. Su funcionamiento se basa en formar una imagen de salida computando una combinación lineal de la intensidad del pixel central con los promedios de intensidad de una ventana móvil [4]. Este filtro fue posteriormente mejorado por el propio Lee, para corregir el efecto de ruido en los límites de la ventana móvil, mediante el uso del gradiente local para estimar su orientación [2]. En la figura 1 se puede apreciar el efecto de desmoteado generado por este filtro.
2. **Filtro de Frost:** que, a partir de un modelo de sistema de imagen coherente, deriva, mediante estadísticas locales, una aproximación paramétrica de la función de autocorrelación de la reflectividad [2]. Este filtro busca un balance entre el promediado y un filtro de paso completo, formando un Kernel del filtro en forma exponencial que puede variar desde un filtro de promediado básico hasta un filtro identidad en una base puntual y adaptativa. [4]
3. **Filtro de Kuan:** este filtro consiste en la implementación exacta de la solución del error medio cuadrático mínimo lineal (LMMSE, por su sigla en inglés), partiendo de un modelo de señal que comprende la media y la varianza no estacionaria y luego una matriz de covarianza diagonal [9]. Requiere la estimación de la media y la varianza local en un vecindario de 5x5 pixeles [5]. La solución es conocida como una LMMSE Local, ya que contiene solo estadísticas de primer orden locales, media y varianza, que son fácilmente calculadas en una ventana móvil. De acuerdo con lo anterior, el estimado óptimo de

reflectividad,  $\hat{f}$ , es dado como una combinación del valor sin filtrar,  $g$ , y de su promedio local  $\bar{g}$ , aproximando la media local, con pesos no negativos y que suman 1.0 [2].

4. **Filtro MAP:** Otra técnica relevante desarrollada en los últimos años, corresponde a la compresión estadística de onda con una aproximación bayesiana máxima a posteriori, denominada técnica MAP y que se enfoca en la selección de las más pertinentes prioridades para los coeficientes de señal [5]. Esta técnica forma parte de los métodos bayesianos en el dominio espacial y luego de haber sido propuesta a principios de la década de los 90s, ha sido objeto de mejoras sustanciales. Sin embargo, en análisis llevados a cabo en [2], se observa que se ha alcanzado cierta saturación de desempeño en los métodos de desmoteado espacial. La inclusión de los campos aleatorios de Gauss-Markov y Gibbs para el modelado preferente [10], ha permitido que este método continúe siendo utilizado hasta la actualidad.



**Fig. 1** Ejemplo de aplicación de Filtro de Desmoteado: (a) imagen SAR original de 5 pasadas del satélite ERS-2. (b) Filtro Lee Mejorado. (Fuente: [2])

#### B. **Métodos Bayesianos en el Dominio Transformado.**

A excepción de unos pocos métodos que emplean los conceptos de multiresolución sin un análisis formal, como es el caso del filtro de Meer y especialmente el filtro basado en la pirámide Laplaciana, todos los filtros revisados en esta sección explotan la transformación de onda discreta (wavelet, por su nombre en inglés) [2].

1. **Filtro de Meer:** este filtro considera una vecindad local constituida por un conjunto de 3 ventanas móviles concéntricas de  $7 \times 7$ ,  $5 \times 5$  y  $3 \times 3$ . Si la ventana es considerada

homogénea se le asigna al pixel el valor del promedio espacial. En aquellos lugares considerados discontinuos se aplica una ventana de 3x3 con un método de suavizado de los mínimos cuadrados. [11]

2. **Filtro RLP:** el método de Pirámide Racional Laplaciana (RLP, por su sigla en inglés) introducido por [12] es una evolución del filtro de Pirámide Laplaciana Mejorado, introducido por los mismos autores en [13]. En este método se aplican estadísticas locales a diferentes resoluciones espaciales de la RLP para una imagen con moteado. Cada pirámide es caracterizada por una proporción señal-ruido, que se incrementa a medida que la resolución decrece. [12]

3. **Filtro Homomórfico en el Dominio de la Onda:** esta técnica se basa en que las ondas son sensibles al ruido, por lo que pueden ser utilizadas para la reducción del ruido de moteado [14]. De hecho, cada sub-banda de la onda puede ser asociada a una contribución en el moteado que puede ser precisamente medida y filtrada. [2]

### C. **Métodos No Bayesianos.**

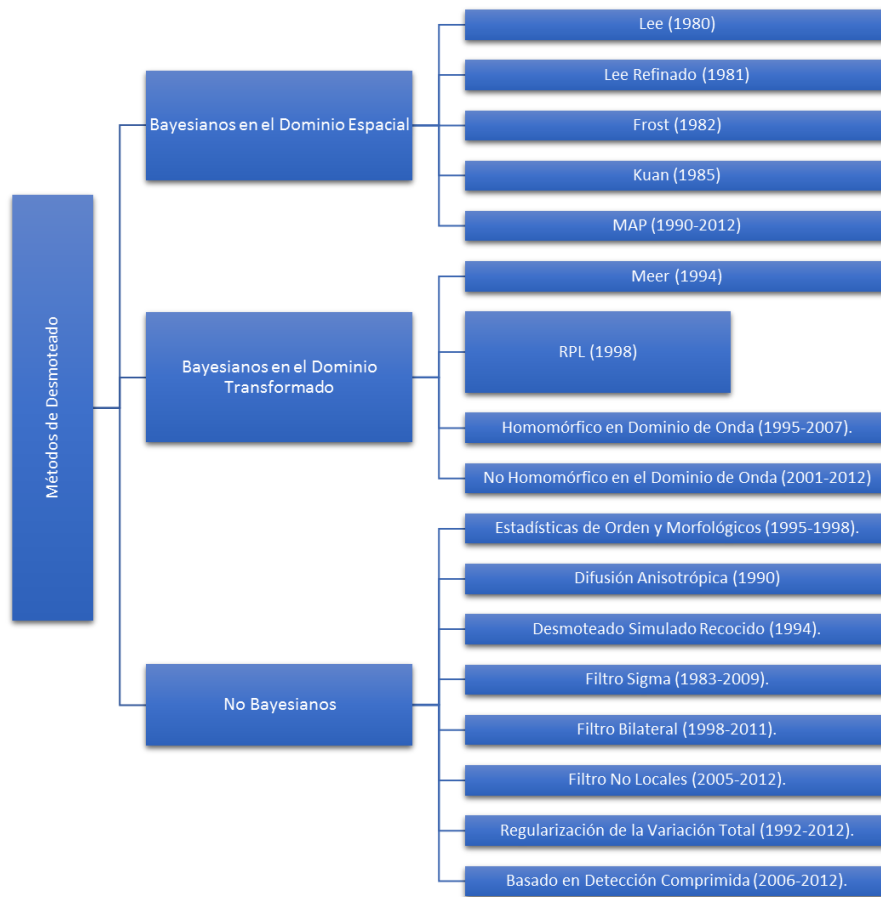
Existe también, un conjunto de aproximaciones no bayesianas para reducir el moteado y que han sido desarrolladas a lo largo de los últimos 30 años [2]. Entre las más utilizadas se encuentran:

1. **Estadísticas de Orden y Filtros Morfológicos:** Se caracterizan por preservar los bordes en las imágenes, tal como es el caso de la versión condicional del filtro de la mediana desarrollado en [15], y que reemplaza el valor del pixel central de la ventana móvil con la mediana de la muestra solo si detecta que el pixel central es un valor atípico [2]. El Filtro Geométrico, también preserva los bordes y suaviza el moteado explotando una aproximación morfológica para suavizar el ruido de una línea de la imagen a la vez utilizando un algoritmo complementario de cáscara envolvente. [16]

2. **Difusión Anisotrópica:** Desarrollado por [17], es una técnica muy popular en el área de procesamiento de imágenes, que ayuda a reducir el ruido de la imagen sin remover partes significativas del contenido de la imagen. Para hacer esto se escoge un coeficiente de difusión que varía espacialmente, favoreciendo el suavizado intra-región en lugar del inter-región [17]

3. **Filtros No Locales:** Es una de las soluciones más interesantes y prometedoras dentro de las aproximaciones no Bayesianas [18] y consiste en una generalización del concepto de promedio ponderado impulsado por los datos, en el cual cada pixel es ponderado de acuerdo a su similaridad con el pixel de referencia [2]. El filtro denominado BM3D (*Block Matching 3D*, por su sigla en inglés), forma parte de esta categoría y combina el principio de la no localidad de la media con una forma de representación del dominio de onda: grupos de pixeles 3D agrupados por su similaridad con un bloque de referencia. [2]

Existen además otras técnicas menos utilizadas, que se pueden considerar no Bayesianas, como el Desmoteado Simulado Recocido [19], el Filtro Sigma introducido por Lee [20], el Filtro Bilateral [21], el de Regularización de la Variación Total [22] y el de Detección Comprimida, que se basa en la teoría de modelos dispersos [23]. Un resumen de los distintos métodos de desmoteado puede ser apreciado en la figura 2.



**Fig. 2** Resumen de los métodos de desmoteado más utilizados según [2], [7], [6] y [5].  
(Fuente: realización propia)

### III. Evaluación de la Calidad de las Técnicas de Desmoteado de Imágenes SAR.

La existencia de una gran variedad técnicas de desmoteado requiere del desarrollo de un proceso de evaluación de la calidad con fines de comparar cuál es la mejor técnica para una imagen dada que corrija el problema, pero no degrade sensiblemente la imagen original. Este proceso debe ir más allá de la comparación visual subjetiva de los resultados, y por esta razón, en este artículo se hace mención también a distintas técnicas propuestas para la evaluación de las imágenes. Dichas imágenes pueden ser generadas mediante algoritmos de simulación que producen imágenes SAR que corresponden a escenas canónicas [3], como el Simulador de Señal Cruda SAR o SARAS [5] o mediante la utilización de imágenes SAR reales [7].

Establecer de forma inequívoca y cuantificable la calidad del proceso de desmoteado en cada uno de los cinco aspectos citados previamente [6] es una tarea compleja, principalmente porque para las imágenes SAR reales, no se cuenta con una imagen de referencia con reflectividad libre de ruido, útil para compararla con la imagen filtrada. Una forma de solventar esta carencia consiste en la utilización de una imagen óptica capturada por un sensor pasivo para aplicarle, mediante algún algoritmo de simulación, el moteado característico de las imágenes SAR. Esta técnica, tiene la desventaja de que las estadísticas inherentes a una imagen óptica difieren de las obtenidas en una imagen SAR [3].

Otra opción frecuentemente utilizada para evaluar la calidad de los filtros de desmoteado se basa en la generación de imágenes SAR simuladas. Mediante la creación simulada de imágenes de la misma zona se puede contar con una imagen *multilook* “limpia” que sirve como referencia [2]. Debido a que el moteado es un proceso aleatorio, una imagen *multilook* SAR es aquella formada por la observación de un punto de la superficie desde varios ángulos, lo que permite aplicar técnicas estadísticas, como la moda o la media de un pixel y de esta manera reducir estadísticamente el moteado. A esta imagen se le conoce generalmente como *true multilook* [5] y es utilizada como imagen de referencia al ser considerada una imagen “limpia” o libre de moteado.

En las imágenes SAR reales, normalmente se puede llevar a cabo un *multilook* de la imagen a costa de la reducción de la resolución espacial. Los generadores SAR permiten simular un número arbitrariamente alto de imágenes con *vistas* o *looks* distintos de la misma zona, que posteriormente son fusionadas produciendo una única imagen estadísticamente correcta [5]. Posteriormente se puede utilizar alguna de las *vistas* o *looks* generadas por el simulador, aplicar cualquiera de los filtros de desmoteado y comparar los resultados con la imagen *true multilook* [3].



Para la simulación de imágenes SAR, se utilizan los denominados Generadores SAR Electromagnéticos, desarrollados en los últimos 20 años. Estos permiten llevar a cabo una evaluación con los llamados índices de referencia, debido a que presuponen la existencia de una imagen libre de ruido para contrastar los resultados. En la próxima sección se describirá con mayor detalle el proceso de generación de dichas imágenes simuladas.

#### **A. Simulación de Imágenes SAR.**

Con la finalidad de proveer un ambiente de pruebas controlado para llevar a cabo el proceso de desmoteado de imágenes SAR y posteriormente evaluar la calidad de las imágenes resultantes, es común la utilización de imágenes canónicas creadas mediante los denominados generadores SAR Electromagnéticos. Ellos comprenden un conjunto de algoritmos que están basados en modelos físicos y geométricos, que consideran la propagación de la onda electromagnética y su interacción con los elementos de la superficie terrestre [2]. Estos generadores permiten generar un arbitrariamente alto número de realizaciones de la misma imagen, llevando a cabo un verdadero “*multilook*” estadístico, sin sacrificar la resolución espacial como ocurre cuando se aplica esta técnica con imágenes SAR reales [3]. A las imágenes moteadas simuladas se les puede aplicar cualquiera de los filtros de desmoteado anteriormente mencionados y comparar los resultados obtenidos con los resultados “ideales” que corresponden a la imagen limpia generada por simulación.

En el trabajo descrito en [3], se implementó un proceso para la generación de imágenes SAR simuladas, con la finalidad de evaluar distintas técnicas de desmoteado de imágenes. El procedimiento requiere un conjunto de datos de entrada para simular el comportamiento de la retrodispersión de la onda: un Modelo Digital de Elevación (DEM), una descripción sintética de la rugosidad de la resolución de la celda (debido a que el valor del pixel se obtiene del promediado de múltiples rebotes dentro de dicho pixel, y estos varían en función de la rugosidad interna del pixel), los parámetros electromagnéticos de la superficie y del radar y los datos orbitales del sensor. El resultado es un conjunto de imágenes SAR canónicas que fueron utilizadas para la evaluación de la calidad del desmoteado obtenido por los filtros de Frost, SA-WBMMAE [24] y SAR-BM3D.

Otro simulador de señales SAR crudas bien conocido es el denominado SARAS [25] que está basado, en primer lugar, en modelos sonoros geométricos y electromagnéticos para la evaluación de la función de reflectividad de la escena y adicionalmente sobre un modelo para la función de transferencia del sistema, que es usado para la evaluación de la señal cruda [5]. Con respecto a la generación del Modelo Digital del Terreno (DEM), requerido para modelar el comportamiento de la retrodispersión de la señal SAR sobre el terreno, se

puede utilizar la función fractal de Weierstrass–Mandelbrot [26], que introduce la variable orográfica en el modelo. También podría utilizarse un DEM real de un área aleatoria, si este cumple con los criterios de distribución normalizada requeridos.

En resumen, aplicando los procedimientos descritos, es posible obtener tanto imágenes SAR simuladas moteadas, como imágenes libres de moteado, a través de la aplicación de un filtro True *multilook*, mediante el promediado de un número alto pero finito (512 en el caso de [3]) de imágenes con ruido previamente simuladas. El papel de estas imágenes SAR simuladas en el proceso de la evaluación de la calidad del desmoteado de distintos filtros es clave, ya que permite emplear métodos cuantitativos (con referencia) y comparar el desempeño entre técnicas. Sin embargo, es importante destacar que los resultados serán tan buenos como lo son los modelos de generación SAR utilizados. [5]

#### **Descripción de Métodos de evaluación de la calidad del Desmoteado.**

El incremento en la cantidad de técnicas de desmoteado de imágenes SAR desarrolladas en los últimos años y la diversificación de sus usos por una mayor disponibilidad de satélites SAR, hace necesario definir cuáles son los más adecuados métodos de evaluación de la calidad de los resultados. [4]

Un primer método de evaluación de la calidad consiste en la inspección visual de las imágenes filtradas. Este método tiene la ventaja de permitir la detección de las principales características visibles por el ojo humano, como la preservación de bordes, grado de difuminado, preservación de puntos objetivos, así como la presencia de objetos estructurales que son difícilmente detectables por mediciones objetivas y directas [2]. Sin embargo, es claro que este enfoque cuenta con importantes limitaciones, principalmente la incapacidad de efectuar comparaciones cuantitativas del desempeño entre distintas técnicas de desmoteado.

Otro método consiste en la utilización de algún índice objetivo de calidad de la imagen, los cuales a su vez pueden ser divididos en dos grandes grupos:

- Índices *con referencias*, en los cuales se cuenta con una imagen libre de ruido (como es el caso de las imágenes simuladas o una imagen adquirida por un sensor óptico).
- Índices *sin referencias*, que se basan en el comportamiento estadístico de la señal de los radares SAR y en la presunción del grado de heterogeneidad de la escena subyacente [2].

En ambos casos se da por sentado la imposibilidad de contar con una imagen de referencia SAR real sin moteado del área de estudio, debido a que este último es inherente al mecanismo de adquisición de las imágenes. [3]

Dentro de los denominados índices con referencia, se encuentran: el cuadrado medio del error, la relación señal-ruido o SNR, la relación pico de la señal-ruido o PSNR y la relación de la energía de la señal-ruido o ESNR [2]. Otros índices son el de medición de la similitud estructural de la media, el de la correlación de borde y la figura de mérito de Pratt (FOM). En la Tabla 1 se pueden apreciar las fórmulas de dichos índices.

**Tabla 1** Lista de los índices con referencia para la evaluación del desempeño de los algoritmos de desmoteado. (fuente: [2]).

INDICES	NOTA
$MSE = E[(\hat{f} - f)^2]$	$f, \hat{f}$ : Imágenes libre de moteado y desmoteada
$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{Var[f]}{MSE} \right]$	$Var[\hat{f}]$ : Imagen de varianza libre de moteado
$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{f_{PEAK}^2}{MSE} \right]$	$f_{PEAK}$ : Valor máximo permitido por las muestras de rango dinámico
$ESNR = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{E[f^2]}{MSE} \right]$	$E[f^2]$ : Potencia de la imagen libre de moteado
$MSSIM = \frac{1}{M} \sum_{p=0}^{M-1} \left[ \frac{2 \cdot E[\hat{f}_p] \cdot E[\hat{f}_p] + C_1}{E[\hat{f}_p] + E[\hat{f}_p] + C_1} \cdot \frac{2 \cdot Cov[\hat{f}_p, \hat{f}_p] + C_2}{Var[\hat{f}_p] + Var[\hat{f}_p] + C_2} \right]$	$\hat{f}_p, \hat{f}_p, p = 0, \dots, M$ – Parches imagen libre de moteado y desmoteada $C_1, C_2$ : constantes adecuadas
$EC = \frac{Cov[\hat{f}^H, \hat{f}^H]}{\sqrt{Var[\hat{f}^H]} \cdot \sqrt{Var[\hat{f}^H]}}$	$\hat{f}^H, \hat{f}^H$ : Imágenes desmoteadas y libres de moteado con filtro de paso alto
$FOM = \frac{1}{\max(\hat{N}, N)} \sum_{n=1}^{\hat{N}} \frac{1}{1 + d_n^\alpha}$	$N, \hat{N}$ : Número de puntos pertenecientes a un borde en parches de imágenes libres de moteado y desmoteadas; $d_n$ : distancia euclídana entre el borde del pixel en el parche de imagen desmoteada y el pixel de borde ideal más cercano en la imagen libre de moteado; $\alpha$ : constante adecuada

Con respecto a los índices sin referencia, el principal es el *número equivalente de vistas* o ENL, que permite evaluar el suavizado en las áreas homogéneas, la *relación de imagen*  $r$ , el índice de sesgo, denominado *índice B* y la *relación objetivo-desorden* o TCR [2]. Las fórmulas de dichos índices se encuentran resumidas en la Tabla 2.

Adicionalmente en [7], se propone un nuevo método de estimador sin referencia para imágenes SAR reales, adecuado para cuando no se dispone de información en el terreno. El estimador opera con la imagen de proporción (*image ratio*) que es definida como la relación punto a punto entre la imagen original y la imagen filtrada. Debido a que el modelo multiplicativo presupone que la media del moteado es 1, una imagen de proporción de aspecto para un filtro ideal debería tener también una media de 1.

Otra forma de evaluar la calidad consiste en el cálculo del número estimado de vistas (ENL, por su sigla en inglés) en un área homogénea en la imagen de proporción. En aquellas imágenes idealmente filtradas el ENL estimado debería aproximarse al ENL de la imagen original. [7]

El estimador propuesto, denominado estimador de proporción  $\alpha\beta$ , evalúa las imágenes de proporción de la media y el número estimado de vista (ENL) y, por otra parte, el contenido geométrico remanente en la imagen de proporción. Esta magnitud está definida por la siguiente fórmula:

$$\alpha\beta = \{\alpha \cdot |\delta_{ENL}| + (1 - \alpha) \cdot |\delta\mu|\} + \beta_{ratio} \quad (1)$$

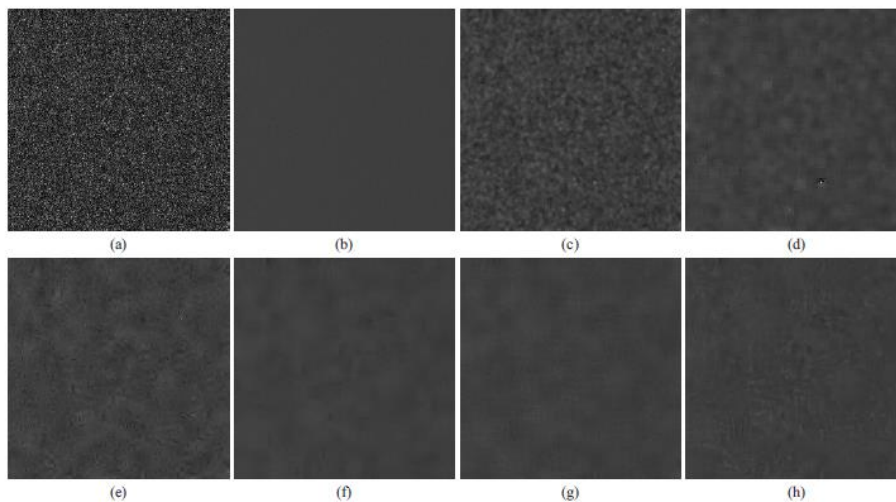
donde  $\alpha \in [0,1]$  y es un valor de ponderación asignado por el usuario que pondera mediante una suma convexa la compensación entre el ENL residual y el  $\delta\mu$ .  $\delta_{ENL}$  es el ENL residual ( $ENL_{ruido} - ENL_{proporción}$ ), obtenido por la resta entre la imagen con moteado y la imagen de proporción obtenida luego del filtrado.  $\delta\mu$  es el residuo del valor medio del moteado ( $1 - \mu_{proporción}$ ), siendo  $\mu_{proporción}$  la media del valor del moteado medido en la imagen de proporción. El valor de  $B_{ratio}$  es proporcionado por un estimador de borde. Un filtro ideal será aquel cuyo  $\alpha\beta = 0$ .

**Tabla 2.** Lista de los índices sin referencia para la evaluación del desempeño de los algoritmos de desmoteado. (fuente: [2]).

INDICES	NOTA
$ENL = \frac{E[\hat{f}]^2}{Var[\hat{f}]}$	$f, \hat{f}$ : Imágenes desmoteadas y libres de moteado; ENL es evaluado en áreas homogéneas
$\mu_r = E[r], \sigma_r^2 = Var[r]$	$r(n) = \frac{g(n)}{\hat{f}(n)}$ : Imagen de proporción
$B = E\left[\frac{(g - \hat{f})}{g}\right]$	
$C_{\hat{f}} = \frac{\sqrt{Var[\hat{f}]}}{E[\hat{f}]}$	$C_r = \sqrt{\frac{C_g^2 - C_u^2}{1 + C_g^2}}$ (valor esperado) $C_u, C_g$ : Coeficientes de variación de la imagen con ruido observada $g$ y el ruido de moteado $u$
$TCR = 20 \log_{10} \frac{\max_p  g }{E_p  g }$	$\mathcal{P}$ : Parche conteniendo un punto objetivo; $\max_p, E_p$ computado sobre el parche

Los resultados presentados por este último trabajo [7] muestran una gran consistencia, presentándose valores de  $\alpha\beta$  altos en diseños de filtrados deficientes. Sin embargo, queda pendiente la comparación de los resultados obtenidos con este estimador con otras técnicas tradicionales de evaluación de la calidad del desmoteado de imágenes SAR.

Por último, en [5], los autores presentan un marco de evaluación comparativa, que estudia el desempeño de un conjunto representativo de algoritmos de desmoteado, utilizando imágenes SAR canónicas simuladas. Con la finalidad de proveer resultados que concuerden con la realidad, se simulan los elementos más relevantes en las imágenes SAR como lo son: homogeneidad, DEM, cuadrículado, esquinas y edificaciones. Todos ellos fueron evaluados para un conjunto de técnicas de desmoteado de cada una de las tres categorías de filtros descritas previamente y los resultados comparados objetivamente entre sí, tal como se muestra en la figura 3 y en la tabla 3.



**Fig. 3** Homogeneidad: prueba, referencia y salida de 6 filtros: (a) Imagen SAR. (b) Imagen Limpia. (c) Kuan. (d)  $r$ -MAP. (e) SAWBMMAE. (f) MAP-S. (g) PPB. (h) SAR-BM3D.(Fuente: [5])

En la siguiente tabla se aprecia la comparación de las mediciones de calidad del desmoteado de las imágenes para 6 filtros distintos. Los parámetros evaluados son: MoI que es el valor de la media de la imagen, MoR es la media de la imagen de proporción, VoR es la varianza

de la proporción, en donde  $VoR < 1$  indica un subsuavizado y  $VoR > 1$  un sobresuavizado de la imagen. ENL es el Número Estimado de Vistas y DG es la medición de la ganancia del desmoteado que se obtiene a partir del error medio cuadrático entre la imagen filtrada y la imagen limpia.

**Tabla 3.** Calidad del desmoteado mediante la medición de la homogeneidad de imágenes SAR Filtradas con 6 técnicas distintas. (Fuente: [5])

	MoI	MoR	VoR	ENL	ENL*	DG
Clean	1.000	0.998	0.987	436.97	510.36	—
Noisy	0.998	—	—	1.00	1.02	0
Kuan	0.998	0.971	0.732	15.95	16.42	11.91
$\Gamma$ -MAP	1.023	0.959	0.824	54.00	57.80	16.64
SAWBMAE	1.017	0.920	0.706	34.40	35.76	14.94
MAP-S	0.998	0.998	0.930	205.93	237.38	21.87
PPB	0.997	0.960	0.820	127.68	140.89	20.29
SAR-BM3D	0.978	0.979	0.814	102.44	111.91	19.40

#### IV. Conclusión.

El perfeccionamiento de las técnicas de desmoteado de imágenes SAR, así como el desarrollo de nuevos algoritmos de filtrado y la integración y fusión entre distintas técnicas, trae como resultado un escenario complejo de comparación del desempeño de las mismas.

En este sentido, la simulación de imágenes SAR mediante modelos físicos y geométricos utilizando generadores SAR permiten producir una imagen sin moteado, denominada *true multilook*, a partir de múltiples realizaciones de la misma escena. El perfeccionamiento de los algoritmos de simulación de imágenes SAR y la estimación de los parámetros para los modelos físicos de la señal de radar más adecuados, juega un rol importante en la posterior evaluación cuantitativa de los resultados para las distintas técnicas de desmoteado. Esto cobra aún más importancia, cuando se considera el hecho de que en las imágenes SAR reales casi nunca se cuenta con valores de referencia sobre el terreno que permitan validar objetivamente las imágenes del área de estudio [5].

A pesar de que algunas técnicas novedosas de filtrado, como la concordancia de bloques 3D o BM3D o los filtros anisotrópicos presentan desempeños bastante consistentes [2], no existe un filtro que pueda ser considerado como absolutamente mejor que los demás. La estandarización de un procedimiento de evaluación objetivo de la calidad del desmoteado es una tarea relevante para un conjunto creciente de disciplinas científicas que hacen uso de las imágenes SAR. En este sentido el estimador  $\alpha\beta$  presentado en [7] tiene interesantes prestaciones, debido a su facilidad de cómputo aunado a la posibilidad de jerarquizar las técnicas de filtrado en imágenes SAR reales.

## Referencias

- [1] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek y K. Papathanassiou, «A Tutorial on Synthetic Aperture Radar,» *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, n° 1, pp. 6-43, 2013.
- [2] F. Argenti, A. Lapini, T. Bianchi y L. Alparone, «A Tutorial on Speckle Reduction in Synthetic Aperture Radar Images,» *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, n° 3, pp. 6-35, 2013.
- [3] G. Di Martino, M. Poderico, G. Poggi, D. Riccio y L. Verdoliva, «SAR Image Simulation for the Assessment of Despeckling Techniques,» *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1797-1800, 2012.
- [4] . S. Dellepiane y E. Angiati, «Quality Assessment of Despeckled SAR Images,» *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, n° 2, pp. 691-707, 2014.
- [5] G. Di Martino, M. Poderico, G. Poggi, D. Riccio y L. Verdoliva, «Benchmarking Framework for SAR Despeckling,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, n° 3, pp. 1596 - 1615, 2014.
- [6] D. Gragnaniello, G. Poggi, G. Scarpa y L. Verdoliva, «SAR Image Despeckling by Soft Classification,» *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, n° 6, pp. 2118 - 2130, 2016.
- [7] L. Gomez, M. E. Buemi, J. C. Jacobo-Berlles y M. E. Mejail, «A New Image Quality Index for Objectively Evaluating Despeckling Filtering in SAR Images,»

*IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, n° 3, pp. 1297 - 1307, 2016.

- [8] J.-S. Lee, «Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics,» *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 2, n° 2, pp. 165-168, 1980.
- [9] B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti y A. Garzelli, «Coherence estimation from multilook incoherent SAR imagery,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, n° 11, pp. 2531 - 2539, 2003.
- [10] D. E. Molina, D. Gleich y M. Datcu, «Evaluation of Bayesian despeckling and texture extraction methods based on Gauss–Markov and auto-binomial Gibbs random fields: Application to TerraSAR-X data,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, n° 5, pp. 2001-2025, 2012.
- [11] P. Meer, R. Park y K. Cho, «Multiresolution Adaptive Image Smoothing,» *Graphical Models And Image Processing*, vol. 56, n° 2, pp. 140-148, 1994.
- [12] B. Aiazzi, L. Alparone y S. Baronti, «Multiresolution local-statistics speckle filtering based on a ratio Laplacian pyramid,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n° 5, pp. 1466-1476, 1998.
- [13] B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti, y G. Borri, «Pyramid-based multiresolution adaptive filters for additive and multiplicative image noise,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 45, n° 8, pp. 1092-1097, 1998.
- [14] M. Simard, G. DeGrandi, K. P. B. Thomson, y G. B. Bénéié, «Analysis of speckle noise contribution on wavelet decomposition of SAR images,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n° 6, pp. 1953 - 1962, 1998.
- [15] L. Alparone, S. Baronti, y R. Carlà, «Two-dimensional rank conditioned median filter,» *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 42, n° 2, pp. 130-132, 1995.



- [16] T. R. Crimmins, «Geometric filter for speckle reduction,» *Applied Optics*, vol. 24, n° 10, pp. 1438-1443, 1985.
- [17] J. Malik y P. Perona, «Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion,» *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, n° 7, pp. 629 - 639, 1990.
- [18] C.-A. Deledalle, L. Denis, y F. Tupin,, «Iterative Weighted Maximum Likelihood Denoising With Probabilistic Patch-Based Weights,» *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, n° 12, pp. 2661 - 2672, 2009.
- [19] R. G. White, «A Simulated Annealing Algorithm for SAR and MTI,» *Proc. SPIE SAR Data Processing*, vol. 2316, p. 339–360, 1994.
- [20] J.-S. Lee, «Digital Image Smoothing and the Sigma Filter,» *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 24, n° 2, p. 255–269, 1983.
- [21] C. Tomasi y R. Manduchi, «Bilateral Filtering for Gray and Color Images,» pp. 839-846, 1998.
- [22] L. I. Rudin, S. Osher, y E. Fatemi, «Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms,» *Physica D*, vol. 60, n° 1-4, pp. 259-268, 1992.
- [23] D. L. Donoho, «Compressed Sensing,» *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, n° 4, p. 1289–1306, 2006.
- [24] M. I. H. Bhuiyan, M. O. Ahmad, y M. N. S. Swamy, «Spatially adaptive wavelet-based method using the Cauchy prior,» *IEEE Trans. Circuits Syst. Video*, vol. 17, n° 4, pp. 500-507, 2007.
- [25] G. Franceschetti, M. Migliaccio, D. Riccio y G. Schirinzi, «SARAS: a SAR raw signal simulator,» *IEEE Trans. Geosci.*, vol. 30, n° 1, pp. 110-123, 1992.
- [26] G. Franceschetti y D. Riccio, *Scattering, Natural Surfaces, And Fractals*, Amsterdam: Academic Press, 2006, p. 283.

