

Assessment of the Merger with Images Ikonos Radarsat-2 Using Wavelet Transform Daubechies

Rubén Javier Medina Daza, PhD.¹, John Jairo Murcia Sandoval, Eng.¹, Lizeth Astrith Lesmes Piñeros, Eng.¹

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, rmedinadaza@gmail.com, jjmurcias@correo.udistrital.edu.co, lalesmesp@correo.udistrital.edu.co

Abstract– This article presents Daubechies transforms Wavelet’s assessment for fusing optical-multispectral-Ikonos-images and polarimetric-radar-images (HH and HV polarization). Several themes are addressed first of all the theoretical axis of the Wavelet transform, which were applied to five Wavelet of Daubechies family (db2, db3, db4, db5, db8); then the efficiency of these transformed is evaluated to fuse these two images (Radarsat-2 and Ikonos) both of them qualitatively by means of shapes, colors and textures that is contribution of radar image, and quantitatively by means of the Q indices, correlation coefficient, RASE index and ERGAS index.

The best results were obtained with the Wavelet Daubechies db8 in the HV polarization which obtained a spectral and textural gain.

Keywords— Radarsat-2, polarimetric, Ikonos, Wavelet, fusion.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.175>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.175>

EVALUACIÓN DE LA FUSIÓN DE IMÁGENES RADARSAT-2 CON IKONOS USANDO LA TRANSFORMADA WAVELET DAUBECHIES

Abstract— This article presents Daubechies transforms Wavelet's assessment for fusing optical-multispectral-Ikonos-images and polarimetric-radar-images (HH and HV polarization). Several themes are addressed first of all the theoretical axis of the Wavelet transform, which were applied to five Wavelet of Daubechies family (db2, db3, db4, db5, db8); then the efficiency of these transformed is evaluated to fuse these two images (Radarsat-2 and Ikonos) both of them qualitatively by means of shapes, colors and textures that is contribution of radar image, and quantitatively by means of the Q indices, correlation coefficient, RASE index and ERGAS index.

The best results were obtained with the Wavelet Daubechies db8 in the HV polarization which obtained a spectral and textural gain.

Keywords—Radarsat-2, polarimetric, Ikonos, Wavelet, fusion.

Resumen— En este artículo se presenta la evaluación de la transformada Wavelet Daubechies para la fusión de imágenes de radar polarimétrico (polarización HH y HV) con las imágenes ópticas multispectrales de Ikonos. Se abordan varias temáticas, por un lado el eje teórico de la transformada Wavelet, de las cuales fueron aplicadas cinco Wavelet de la familia Daubechies (db2, db3, db4, db5, db8), seguidamente se evalúa la eficiencia de estas transformadas para la fusión de estas dos imágenes (Radarsat-2 e Ikonos) tanto cualitativamente por medio de formas, colores y texturas que es lo que más aporta la imagen de radar, como cuantitativamente por medio de los índices de Calidad Universal Q, Coeficiente de Correlación, RASE y ERGAS.

Los resultados más óptimos fueron obtenidos con la Wavelet Daubechies (db8 - NI) en la polarización HV la cual obtuvo la mayor ganancia espectral y textural.

Palabras claves—Radarsat-2, polarimetría, Ikonos, Wavelet, fusión.

I. INTRODUCCIÓN

Las imágenes ópticas y de radar caracterizan propiedades del territorio dentro de una escena en diferentes regiones del espectro electromagnético. En la región óptica, la respuesta de la escena es básicamente debida a la reflectividad del terreno, en la región de radar la respuesta es más compleja dependiendo de factores físicos y geométricos del terreno [1] [2]. Las propiedades de ambas regiones son complementarias y conjuntamente proporcionan información valiosa para evaluar el comportamiento del territorio de la zona de estudio. La combinación de imágenes radar y ópticas presenta dos posibilidades [1]: primero la formación de compuestos falso

color con el objeto de realzar visualmente los rasgos del terreno presentes en las imágenes, y segundo la inclusión de ambas imágenes en procesos de análisis digital.

La combinación de imágenes radar y ópticas para fines de realce visual se lleva a cabo por medio de combinación de bandas y de transformaciones al espacio de color (representaciones RGB). Para un análisis digital es necesario considerar a la imagen de radar como portadora de un cierto tipo de información, como es el caso de la información textural, debido a su estructura geométrica. La textura es un elemento de análisis que puede ser empleado en combinación con información espectral, en procesos de clasificación de la cobertura del terreno.

Por otro lado, las imágenes ópticas contienen información espectral complementaria a la información textural, de esta manera es factible construir imágenes contextuales que incorporen información espectral y espacial de las escenas. [1] [2].

En ambos casos es necesario puntualizar que: las imágenes de radar y ópticas no tienen en general el mismo tamaño de pixel, no presentan ni el mismo tipo, ni el mismo nivel de ruido, no están coo-registradas y, por ultimo no tienen en general el mismo nivel de cuantización. De aquí entonces es necesario estandarizar las imágenes al mismo formato, referirlas a un sistema de coordenadas común, filtrar el ruido y normalizarlas radiométrica y geoméricamente, para realizar los análisis posteriores

II. OBJETIVO

Evaluar la fusión de imágenes de Radarsat-2 con las imágenes satelitales IKONOS usando la transformada de Wavelet Daubechies, con el fin de generar imágenes multispectrales con mayor información textural.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales y Zona de Estudio

Las imágenes empleadas para el desarrollo del presente artículo son una imagen de Radar y una imagen Ikonos. La imagen Radarsat2 con polarización HH y HV, con 15 metros de resolución espacial, resolución radiométrica de 16 bits, la

cual fue tomada en el año 2011 (fig. 1b y 1c). La imagen IKONOS multiespectral tiene una resolución espacial de 4 metros, resolución radiométrica de 16 bits, y fue adquirida en el año 2007 (fig. 1a).

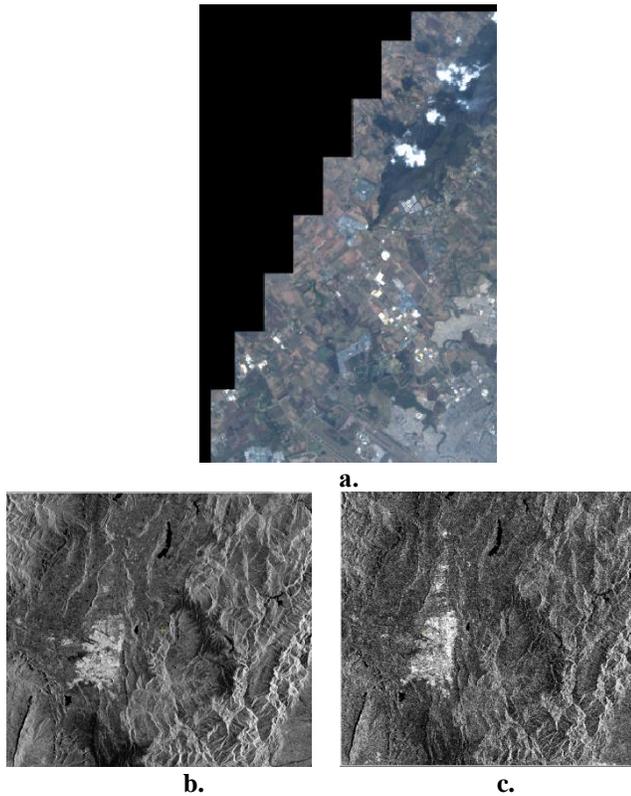


Fig. 1 a. Imagen original IKONOS Multiespectral combinación verdadero color. b. Imagen original polarización HV. c. Imagen original polarización HH.

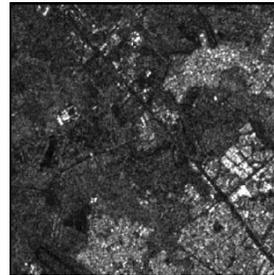
La zona de estudio es la sabana noroccidental de la ciudad de Bogotá D.C., Colombia, la cual fue escogida gracias a sus características biofísicas pues presenta diferentes tipos de coberturas como: construcciones urbanas, cuerpos de agua, cultivos entre otras, que se presentan de diferentes formas en las imágenes por las características espectrales de las mismas.

Se seleccionó una sub-escena de las imágenes (fig. 2) de tamaño diádico (imagen de tamaño de 2^n) ya que debe cumplir esa condición para poder aplicar la transformada Wavelet.

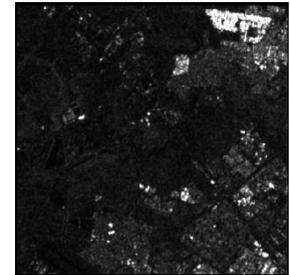
La sub-escena de interés tiene un tamaño de 1024 X 1024 píxeles, tanto para las imágenes de radar como para la imagen IKONOS. Para la ejecución del estudio se realizó un tratamiento previo que consistió en una reproyección y resamplado de pixel a 5 metros en todas las imágenes para así obtener la misma área efectiva en el recorte y finalmente una normalización radiométrica a 8 bits. El tamaño de pixel fue seleccionado de tal manera que permitiera mantener una relación numérica entera entre la imagen de Radar y la imagen multiespectral.



a.



b.



c.

Fig. 2. Imágenes recortadas para delimitar la zona de estudio. a. Imagen original IKONOS. b. Imagen original polarización HV. c. Imagen original polarización HH.

B. Transformada Wavelet

El análisis multiresolución basado en la teoría de Wavelet, permite la presentación de los conceptos de detalle entre niveles sucesivos de escala o resolución.

La transformada de Wavelet de una distribución $f(t)$ puede ser expresada como:

$$W(f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Donde a y b son escalares y parámetros de translación. Cada función base $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ es una versión escalonada y traducida de una función llamada Wavelet Mother [3] [4]. Esta función de base es:

$$\int \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = 0 \quad (2)$$

C. Transformada Wavelet Daubechies

Son una familia de Wavelets inventadas por Ingrid Daubechies. Tienen la característica de ser ortonormales lo que las hace aptas para el análisis discreto. El nombre de las Wavelets de esta familia viene dado por dbN, donde N es el orden (fig. 3) [5].

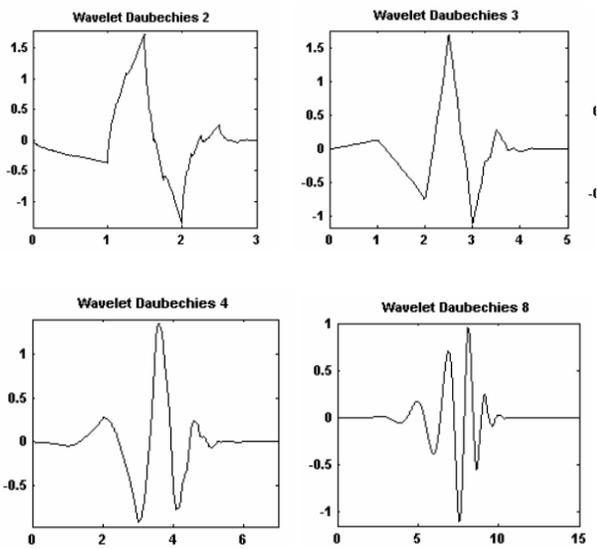


Fig. 3 Familia Wavelet Daubechies. Orden 2, 3, 4 y 8.

D. Concepto de ARSIS

El “Concepto ARSIS” (Accroissement de la Résolution Spatiale par Injection de Structures en frances) es el incremento de la resolución por inyección de estructuras, este método utiliza la información de mayor resolución espacial para “inyectarla” a la resolución espectral, lo que define una estrategia para la fusión de imágenes.

Entre las condiciones básicas de ARSIS debe existir una similitud entre estructuras fisiográficas observadas en las bandas espectrales, sin que esto suponga que hay un recubrimiento entre bandas ni que los coeficientes de correlación entre las imágenes sean elevados.

E. Fusión de imágenes con la descomposición de Wavelet Daubechies

El método consiste en combinar los coeficientes de la Wavelet de la imagen de radar con la imagen multispectral (baja resolución). Para el efecto, se tiene en cuenta la relación entre los tamaños de píxel de la imagen radar y de la imagen multispectral.

La fusión de imágenes basada en Wavelet puede ser realizada de dos formas:

- 1). El método de sustitución consiste en reemplazando los coeficientes Wavelet de la imagen multispectral por los coeficientes correspondientes de la imagen de radar.
- 2). Método por adición de coeficientes de imagen de radar a los datos de la multispectral

En el método de sustitución, los planos de Wavelet correspondientes a la imagen multispectral son rechazados y sustituidos por los planos correspondientes de la imagen de radar. Sin embargo, en el método de adición toda la información espacial es preservada en la imagen

multiespectral. Así, la gran ventaja del método de adición es que la información de detalle de ambos sensores es usada. La principal diferencia entre adicionar los planos Wavelet de radar al componente intensidad es que la información de radar es adicionada a todas las tres bandas R, G y B, mientras que en la sustitución reemplaza la intensidad por la imagen de radar.

Los métodos de fusión de Wavelet se basan en el hecho que, en la descomposición de Wavelet, las imágenes ($l=0, \dots, n$) son versiones sucesivas de la imagen original en escalas incrementadas, así, los primeros planos de la Wavelet de la imagen de radar tiene información textural-espectral que no está presente en la imagen multispectral.

La descomposición es un proceso realizado en forma iterada, con sucesivas aproximaciones (lo cual define los niveles de descomposición). El retorno a la imagen original se conoce como descomposición de Wavelet en árbol.

La imagen original (S) es descompuesta en coeficientes de aproximación ($A1$) y coeficientes de detalle ($D1$), los coeficiente de aproximación ($A1$) se descomponen en nuevos coeficientes de aproximación ($A2$), y coeficientes de detalle ($D2$), se realiza de nuevo la descomposición de los coeficientes de aproximación ($A2$), en nuevos coeficiente de aproximación y detalles así sucesivamente. Para recuperar la imagen original se adiciona la última descomposición de los coeficientes de aproximación con cada una de las descomposiciones de los coeficientes de detalle.

La transformación de Wavelet en dos dimensiones permite descomponer una imagen (S) en diferentes niveles de resolución espacial. El primer nivel de descomposición tiene la misma resolución espacial de la imagen original. El segundo nivel de descomposición tiene la mitad de la resolución espacial de la imagen original y así sucesivamente. Cada nivel permite descomponer la imagen en coeficientes de detalle horizontal, vertical y diagonal donde se encuentra la información espacial de la imagen y en coeficientes de aproximación se encuentra la información espectral de la imagen. A partir de estos coeficientes, se puede reconstruir la imagen original [3].

F. Metodología implementada para la fusión de imágenes radar y multispectral con la descomposición de Wavelet Daubechies

Como resultado de esta investigación se proponen los siguientes pasos para implementar la fusión de imágenes de radar con imágenes multispectrales, ejemplificando el nivel de descomposición quinto (máximo nivel utilizado en esta investigación). El mismo procedimiento metodológico se realiza para cada uno de los cinco niveles de descomposición propuestos en este trabajo.

- Registrar una composición a color RGB (verdadero color) de la imagen Ikonos multiespectral (MULTI) con la imagen de radar usando el mismo tamaño de píxel.
- Transformar los componentes RGB de la imagen MULTI en componentes IHS.
- Aplicar el concepto de la Transformación de Wavelet Daubechies al componente I, iterativamente hasta el quinto nivel descomposición, obteniendo de esta manera los siguientes coeficientes de aproximación y detalle: A1i coeficientes de aproximación que contiene la información espectral de la componente I, V1i, H1i y D1i coeficientes de detalle donde se almacena la información espacial de la imagen. A1i se descompone por segunda vez de esta manera se obtiene coeficientes de aproximación A2i que contiene la información espectral de la componente I y V2i, H2i y D2i coeficientes de detalle donde se almacena la información espacial de la imagen. De manera sucesiva se continúan descomponiendo los coeficientes A2i hasta llegar al quinto nivel donde se obtiene A5i que contiene los coeficientes de aproximación de la información espectral de la componente I y los coeficiente de detalle donde estará la información espacial de la componente I, que son V5i ,H5i , D5i, V4i ,H4i , D4i, V3i ,H3i , D3i, V2i ,H2i , D2i, V1i ,H1i , D1i.
- Aplicar, de manera paralela, el concepto de la Transformación Wavelet Daubechies a la imagen radar (en cada una de las polarizaciones) hasta el quinto nivel descomposición obteniendo de esta manera los coeficientes de aproximación A5r (contiene la riqueza espectral de la imagen radar), y los coeficientes de detalle V5r, H5p, D5r, V4r, H4r, D4r, V3r, H3r, D3r, V2r, H2r, D2r, V1r, H1r y D1r, que contiene la riqueza textural de la imagen radar.
- Generar un nuevo componente, aplicando el concepto ARSIS a través de la concatenación de los coeficientes de aproximación de la componente Intensidad A5i (que almacena la información de la imagen del componente I) y los coeficientes de detalle de quinto nivel de la imagen de radar V5r, H5r, D5r, V4r, H4r, D4r, V3r, H3r, D3r, V2r, H2r, D2r, V1r, H1r y D1r (que almacenan la información textural de la imagen radar). A este nuevo componente se le aplica la transformada Wavelet inversa de Daubechies para obtener un nuevo componente Intensidad (N-I)
- Generar la nueva imagen IHS (N-IHS) con la N-I y las demás componentes originales generadas a partir de MULTI (Matiz y Saturación).
- Realizar la transformación inversa IHS-RGB con la imagen N-IHS.

Con el proceso anterior se han fusionado las imágenes MULTI y radar obteniendo la nueva imagen N-MULT incluyendo así la riqueza textural de la imagen de radar y manteniendo en mayor grado la resolución espectral de la imagen MULTI. La metodología realizada se implementó de manera independiente para cada una de las dos bandas de la imagen de radar (HH, HV).

La fig. cuatro ilustra de manera general la metodología propuesta.

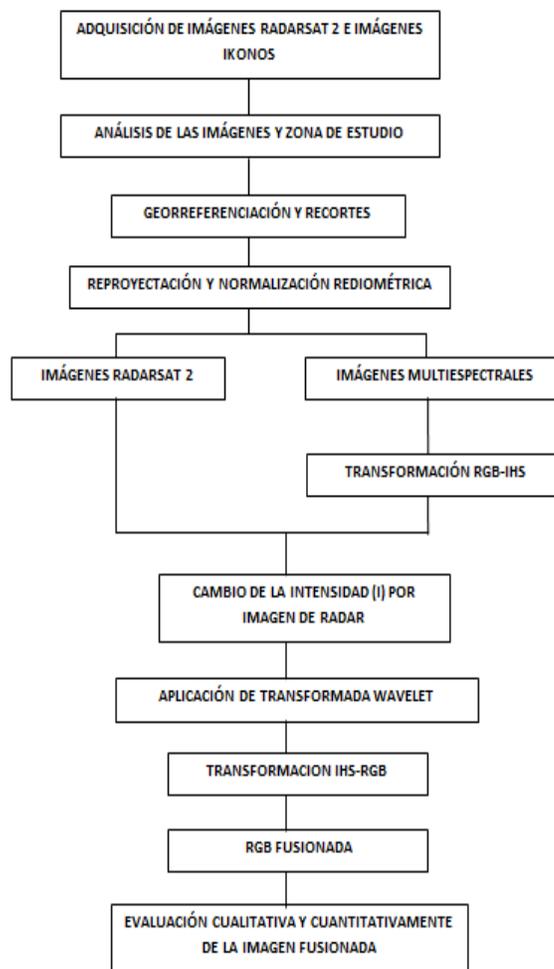


Fig. 4 Metodología empleada para la realización de la Fusión. Fuente: Elaboración propia.

G. Medidas de la calidad de las imágenes fusionadas

1. Coeficiente de correlación:

Para cualificar el comportamiento de los métodos estándar de fusión de imágenes con el proceso basado en Wavelet 2D, calculamos la correlación entre las diferentes imágenes fusionadas y la imagen multiespectral original, para obtener un índice de conservación de la resolución espectral.

$$corr(A/B) = \frac{\sum_{j=1}^{npix} (A_j - \bar{A})(B_j - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{npix} (A_j - \bar{A}) \sum_{j=1}^{npix} (B_j - \bar{B})}} \quad (3)$$

Donde A y B son los valores media de las imágenes correspondientes, corr(A/ B) se llama coeficiente de correlación y varía entre -1 y +1. Se usan los signos + y -

para las correlaciones positivas y negativas, respectivamente. Nótese que $\text{corr}(A/B)$ es una cantidad adimensional, es decir no depende de las unidades empleadas [6].

2. Índice ERGAS:

La evaluación de la calidad de las imágenes fusionadas se ha llevado a cabo mediante los índices ERGAS espectral. La definición ERGAS espectral (Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse) [7], viene dada por la ecuación:

$$ERGAS_{Espect} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_{Bandas}} \sum_{i=1}^{N_{Bandas}} \left[\frac{(RMSE_{Espect}(Banda^i))^2}{(MULTI^i)^2} \right]} \quad (4)$$

Donde h = Resolución espectral de MULTI y l =Resolución de la imagen de Radar

3. Índice RASE:

El índice RASE (Relative average spectral error in ingles) se expresa como un porcentaje y entre más cercano a cero menor será el error y está definido por la siguiente ecuación:

$$RASE = \frac{100}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (RMSE(Banda_i))^2} \quad (5)$$

Donde M es la radiancia media de todas las bandas originales, N el número de bandas fusionadas [8].

4. Índice de calidad universal Q:

Este modelo de índice de calidad identifica cualquier distorsión como una combinación de tres factores: pérdida de correlación distorsión de luminancia y contraste de distorsión [7] y está definida de la siguiente manera:

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y} * \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} * \frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (6)$$

El primer componente es el coeficiente de correlación entre x y y , que mide el grado de correlación lineal entre x y y , y su rango dinámico es $[-1,1]$. El segundo componente, con un rango de valores de $[0,1]$, mide que tanto de la media de la luminancia es entre x y y . Es igual a 1 si y sólo si $x = y$. S_x y S_y puede ser visto como estimación de la diferencia de x y y , por lo que el tercer componente mide la similitud de los contrastes de las imágenes. El rango de valores también es $[0,1]$, donde el mejor valor es 1 y se logra si y sólo si $S_x = S_y$ [7] y

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados se presentarán en tres partes, la primera corresponde a la definición del mejor orden de la transformada Wavelet Daubechies; la segunda se concentra en la selección del mejor nivel de descomposición con la Wavelet seleccionada; y la tercera se centra en la evaluación visual de los resultados.

A. Definición del mejor orden de la transformada Wavelet Daubechies.

Las tablas del I al IV muestran la evaluación cuantitativa de las imágenes fusionadas con la familia Daubechies con los filtros db2, db3, db4, db5 y db8, todas en el primer nivel de descomposición. La evaluación se realizó tanto para la fusión de la imagen de radar con polarización HH como para la polarización HV.

La tabla I ilustra el índice universal Q donde se evidencia que la imagen fusionada con menor distorsión en las tres bandas corresponde a la polarización HV con la transformada Wavelet db8. Las demás imágenes de igual forma se encuentran dentro de un rango de 0,8480 a 0,9439 de lo que se deduce que la fusión da buenos resultados para toda la familia Daubechies.

TABLA I
Índice Q de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas, nivel de descomposición 1.

Polaridad	IMÁGENES	R	G	B
HH	RGB/db2	0,9345	0,8989	0,8480
	RGB/db3	0,9373	0,9033	0,8543
	RGB/db4	0,9387	0,9053	0,8572
	RGB/db5	0,9395	0,9064	0,8589
	RGB/db8	0,9401	0,9072	0,8597
HV	RGB/db2	0,9392	0,9060	0,8582
	RGB/db3	0,9418	0,9101	0,8640
	RGB/db4	0,9431	0,9119	0,8668
	RGB/db5	0,9439	0,9131	0,8684
	RGB/db8	0,9444	0,9138	0,8692

La tabla II presenta los resultados de la correlación donde el mejor resultado obtenido corresponde a las imágenes fusionadas con la db8, tanto en la fusión con HH como con en la HV, siendo esta última la que obtuvo mejores resultados en general. Sin embargo los valores de las demás fusiones se encuentran dentro de un rango de 0,8482 a 0,9466 lo que indica una alta correlación en las tres bandas de la imagen original con las imágenes fusionadas.

La tabla III se ocupa del índice RASE que presenta los porcentajes más bajos de todas las imágenes fusionadas en la imagen HV para la Wavelet db8.

TABLA II.
Índice de Correlación de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas, nivel de descomposición 1.

Polaridad	IMÁGENES	R	G	B
HH	RGB/db2	0,9373	0,9017	0,8482
	RGB/db3	0,9398	0,9059	0,8544
	RGB/db4	0,9411	0,9077	0,8573
	RGB/db5	0,9419	0,9089	0,8590
	RGB/db8	0,9424	0,9096	0,8598
HV	RGB/db2	0,9424	0,9096	0,8586
	RGB/db3	0,9447	0,9133	0,8644
	RGB/db4	0,9459	0,9150	0,8671
	RGB/db5	0,9466	0,9160	0,8688
	RGB/db8	0,9471	0,9167	0,8695

TABLA III.
Índice RASE de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas, nivel de descomposición 1.

Polaridad	IMÁGENES	R (%)	G (%)	B (%)
HH	RGB/db2	13,7256	13,2743	13,1929
	RGB/db3	13,4518	13,0060	12,9294
	RGB/db4	13,3125	12,8831	12,8097
	RGB/db5	13,2256	12,8067	12,7326
	RGB/db8	13,1698	12,7602	12,7013
HV	RGB/db2	13,1853	12,7457	12,6684
	RGB/db3	12,9298	12,4940	12,4202
	RGB/db4	12,7966	12,3753	12,3022
	RGB/db5	12,7130	12,3012	12,2289
	RGB/db8	12,6543	12,2518	12,1977

Finalmente la tabla IV enseña el índice ERGAS, donde nuevamente los mejores resultados se obtienen con la imagen fusionada de polarización HV en la db8. Aunque las estadísticas de las imágenes fusionadas superan el umbral de 3 considerado como valor máximo, los valores no son lo suficientemente lejanos al máximo, por lo cual se aceptan los resultados obtenidos.

TABLA IV.
Índice ERGAS de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas.

Polaridad	IMÁGENES	R	G	B
HH	RGB/db2	4,5752	4,4248	4,3976
	RGB/db3	4,4839	4,3353	4,3098
	RGB/db4	4,4375	4,2944	4,2699
	RGB/db5	4,4085	4,2689	4,2442
	RGB/db8	4,3899	4,2534	4,2338
HV	RGB/db2	4,3951	4,2486	4,2228
	RGB/db3	4,3099	4,1647	4,1401
	RGB/db4	4,2655	4,1251	4,1007
	RGB/db5	4,2377	4,1004	4,0763
	RGB/db8	4,2181	4,0839	4,0659

En general la Wavelet db8 en la polarización HV presenta los mejores resultados en la evaluación cualitativa de todos los índices, razón por la cual esta Wavelet es la seleccionada para continuar con la evaluación de resultados.

B. Definición del mejor nivel de descomposición de la transformada Wavelet Daubechies db8

Al igual que en el aparte anterior, la evaluación cuantitativa se realizó usando los cuatro índices: índice Q (tabla V), correlación (tabla VI), ERGAS (tabla VII) y RASE (tabla VIII). En este caso el objetivo es definir el mejor nivel de descomposición (entre el 1, 2, 3, 4 y el 5) para la Wavelet db8.

En la tabla V se evidencia que la imagen fusionada con menor distorsión es la obtenida con el primer nivel de descomposición (nivel 1), en las tres bandas. Los demás resultados evidencian que a mayor nivel de descomposición la calidad de la fusión disminuye.

TABLA V.
Índice Q de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas.

IMÁGENES	R	G	B
RGB/db8 N1	0,9444	0,9138	0,8692
RGB/db8 N2	0,8868	0,8259	0,7479
RGB/db8 N3	0,8302	0,7418	0,6405
RGB/db8 N4	0,7671	0,6501	0,5287
RGB/db8 N5	0,6432	0,4820	0,3418

Analizando la tabla VI, de manera similar en el índice anterior, los mejores resultados se obtienen con el primer nivel de descomposición.

TABLA VI.
Índice de Correlación espectral de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas db8.

IMÁGENES	R	G	B
RGB/db8 N1	0,9471	0,9167	0,8695
RGB/db8 N2	0,8950	0,8335	0,7485
RGB/db8 N3	0,8440	0,7529	0,6411
RGB/db8 N4	0,7847	0,6619	0,5290
RGB/db8 N5	0,6541	0,4849	0,3435

En la tabla VII se muestran los resultados cuantitativos usando el índice RASE, la imagen fusionada con menor error es la obtenida con el nivel 1 de descomposición.

TABLA VII.
Índice RASE de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas.

IMÁGENES	R (%)	G (%)	B (%)
RGB/db8 N1	12,6543	12,2518	12,1977
RGB/db8 N2	17,5768	16,9854	16,8230
RGB/db8 N3	21,1126	20,3624	20,0753
RGB/db8 N4	24,4195	23,5368	23,1403
RGB/db8 N5	30,5850	29,6338	29,2157

En la tabla VIII se muestran los resultados cuantitativos usando el índice ERGAS, encontrando que de la misma

manera que los índices anteriores, el mejor resultado es el proporcionado por el primer nivel de descomposición.

TABLA VIII.
Índice ERGAS de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas.

IMÁGENES	R	G	B
RGB/db8 N1	4,2181	4,0839	4,0659
RGB/db8 N2	5,8589	5,6618	5,6077
RGB/db8 N3	7,0375	6,7875	6,6918
RGB/db8 N4	8,1398	7,8456	7,7134
RGB/db8 N5	10,1950	9,8779	9,7386

De lo anterior se concluye que el mejor nivel de descomposición para la fusión de imágenes de radar con imágenes multiespectrales donde se busca mantener la información textural ofrecida por la imagen de radar es la Wavelet db8 N1 (nivel de descomposición 1).

C. Evaluación cualitativa de la fusión de imágenes de radarsat-2 con imágenes Ikonos

La fig. 5 ilustra los resultados cualitativos de la fusión de imágenes, en busca de la mejor Wavelet (en concordancia con la sección IV-A). En este caso se decidió analizar una característica en particular (fig. 5b.) para así visualizar los cambios obtenidos y evaluar los detalles texturales de las construcciones. La fig. 5a ilustra la imagen multiespectral con la selección de la ventana a detallar. De otra parte, las fig. 5c y 5d ilustran las imágenes de radar con la polaridad HH y HV respectivamente. Las demás figuras muestran los resultados de las imágenes fusionadas con las diferentes Wavelets y los ordenes usados en esta investigación, todos en el nivel de descomposición 1, donde se evidencia que los resultados visuales son similares, no obstante el mejor orden de la Wavelet Daubechies es db8 (tablas I al IV). Igualmente la fig 5 j y 5j muestra la similaridad visual de la fusión de las polarizaciones HH y HV de la imagen de radar.

De otra parte, las fig. 5e al 5j evidencian que la fusión la imagen de radar brinda la riqueza textural a la imagen multiespectral, mientras que se conservó la riqueza espectral de la imagen multiespectral conservando así el color.

En cuanto diversidad de información presente en la fig. 5b y 5c, que corresponden a las polarizaciones de la imagen de radar, está no se evidencia en el resultado final de las imágenes fusionadas (fig. 5i y 5j), ya que se resaltan las texturas de las construcciones pero los resultados visuales son similares, por lo que se puede inferir que el método de la transformada Wavelet elimino el ruido de las imágenes radarsat 2 ya no es notorio en las imágenes fusionadas.

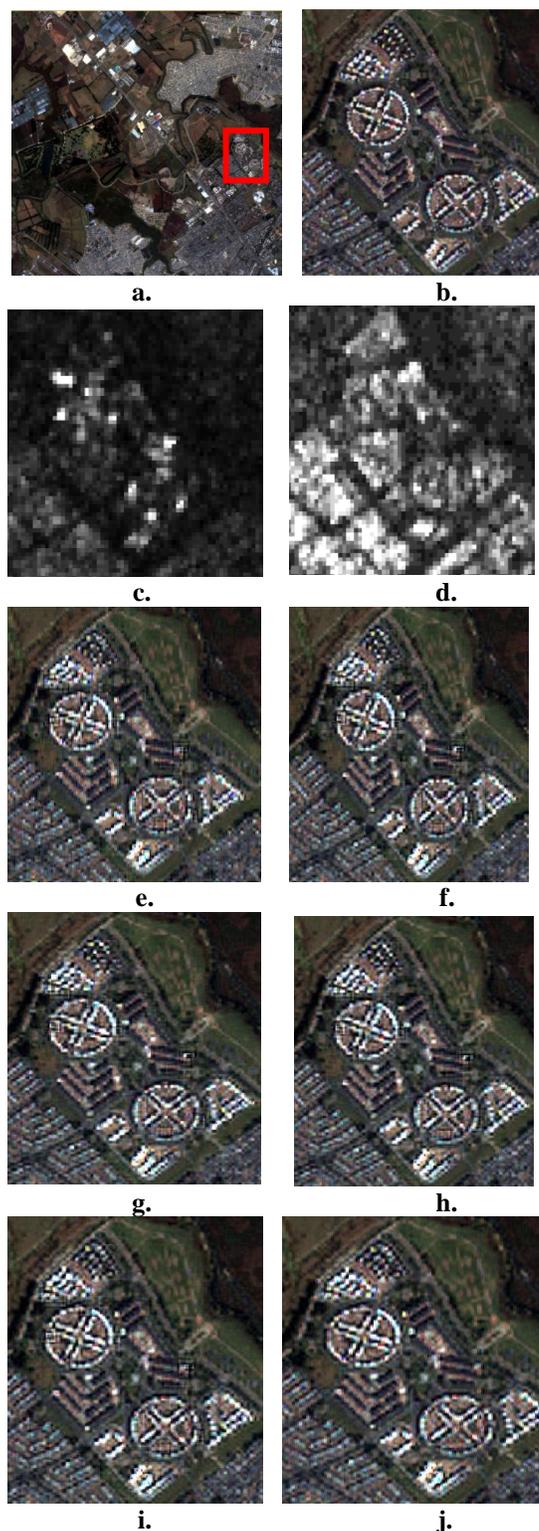


Fig. 5. a. Zona de estudio con localización de la detalle seleccionado. b. Imagen original multiespectral RGB. c. Imagen original HH. d. Imagen original HV. e. Imagen fusionada HV con db2 N1. f. Imagen fusionada HV con db3 N1. g. Imagen fusionada HV con db4 N1. h. Imagen fusionada HV con db5 N1. i. Imagen fusionada HH con db8 N1. j. Imagen fusionada HV con db8 N1.

La fig. 6 muestra los resultados de la fusión de la imagen de radar con la imagen óptica usando la mejor Wavelet seleccionada –db8– en los cinco niveles de descomposición (Sección IV-B). En dicha figura se puede evidenciar la coherencia de la evaluación cuantitativa con los resultados visuales, y es definitivamente el primer nivel 1 de descomposición (Fig. 6b) que presenta una imagen fusionada que guarda, en general, gran similitud con la imagen multiespectral Ikonos, a diferencia del quinto nivel de descomposición (Fig. 6f) donde la imagen fusionada presenta bastante ruido y se pierde la similitud con la imagen multiespectral. Igualmente se evidencia una degradación inversamente proporcional al nivel de descomposición, siendo el mayor nivel de descomposición (quinto) que presenta la imagen con peor calidad visual de los objetos tanto en el color como en la textura.

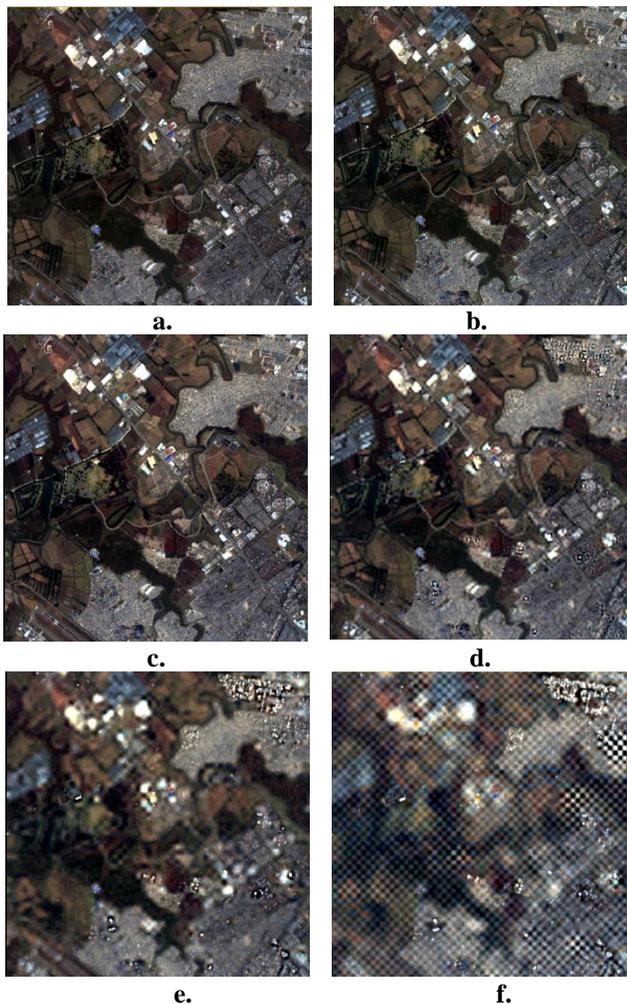


Fig. 6. a. Imagen IKONOS RGB original. b. Imagen fusionada RGB con db8 nivel 1. c. Imagen fusionada RGB con db8 nivel 2. d. Imagen fusionada RGB con db8 nivel 3. e. Imagen fusionada RGB con db8 nivel 4. f. Imagen fusionada RGB con db8 nivel 5.

El tamaño de la imagen multiespectral original limitó el área de estudio a un tamaño de 1024 X 1024 píxeles, ya que la imagen IKONOS al poseer una forma irregular no se pudo aplicar un tamaño diádico de 2^n más grande que si permitía la imagen de radar y así aprovechar en mayor medida las características texturales que esta misma ofrece.

Diferentes estudios han demostrado que en imágenes ópticas entre más niveles de descomposición se apliquen para una fusión con la transformada Wavelet mejores resultados se obtienen. Sin embargo para el presente estudio es todo lo contrario, entre menor sea el nivel de descomposición mejores resultados se obtienen. Es posible que la justificación de este fenómeno se dé porque la imagen de radar aporta otras características, particularmente la textura, a diferencia de la fusión con imágenes ópticas que buscan mejorar la resolución espacial, a pesar de esto los dos tipos de fusiones mantiene en un alto grado la riqueza espectral.

Finalmente, se hace evidente las ganancias espectrales y texturales para las dos imágenes en una fusión, puesto que la imagen de radar es capaz de detectar la riqueza textural de la escena y por ello brinda esa ganancia en la fusión. Por otro lado la imagen contiene información espectral que sirve como complemento en la fusión, así que obtenemos color y textura definida en la nueva imagen.

AGRADECIMIENTOS

Las imágenes ópticas son cortesía del Instituto Colombiano Agustín Codazzi (IGAC) y las imágenes de radar fueron proporcionadas por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Lira, Tratamiento digital de imágenes, Mexico D.F, 2010.
- [2] C. Quegan y S. Oliver, Understanding Synthetic Aperture Radar Images, Artech House, 1998.
- [3] R. Medina, J. Luis y P. Carlos, «Evaluación cualitativa y cuantitativa de la fusión de imágenes,» LACCEI, 2013.
- [4] R. J. Medina, «Evaluación de la fusión de imágenes satelitales usando la Transformada rápida de wavelet haar y counturlet,» LACCEI, 2013.
- [5] M. Misiti, Y. Misiti y G. Oppenheim, «Wavelet Toolbox™ 4, User's Guide,» The MathWorks, 2010.
- [6] R. R. K. C y F. H., «Comparison of different image fusion techniques for individual tree crown identification using quickbird image,» *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Vols. %1 de %2Vol. XXXVIII-1-4-7/W5., 2009.
- [7] Z. Wang y A. Bovink, «A Universal Image Quality Index,» *IEEE Signal.2002*

[8] L. Wald, Data Fusion, Definition and Architectures:
Fusion of Image of Different Spatial Resolution, Paris,
2002.