

Control de la calidad espacial y espectral de imágenes de satélite fusionadas mediante el algoritmo wavelet à trous

C. Gonzalo[†] y M. Lillo-Saavedra[‡]
chelo@fi.upm.es

[†] Universidad Politécnica de Madrid, Facultad de Informática, DATSI, España

[‡] Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
Departamento de Mecanización y Energía, Chile

RESUMEN

Recientemente, han sido propuestos diferentes métodos para fusionar imágenes multispectrales y pancromáticas basados en la transformada Wavelet. Si bien la mayoría de ellos proporciona resultados satisfactorios, en particular el método de fusión mediante el algoritmo de à trous presenta algunas ventajas. Su implementación es muy simple e implica operaciones algebraicas elementales, tales como productos, diferencias y convoluciones. Además, los resultados obtenidos mediante esta estrategia de fusión, poseen una mejor calidad que los obtenidos por otros métodos. Por otra parte, es bien sabido que los métodos de fusión estándar no permiten un control de la calidad espacial y espectral de las imágenes fusionadas. Si la calidad espectral de una imagen obtenida mediante una estrategia de fusión es muy alta, esto implica una baja calidad espacial y viceversa. En este sentido, este trabajo propone una nueva versión de la estrategia de fusión basada en el algoritmo de à trous, que permite establecer un compromiso particular entre la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas. Para ello se ha llevado a cabo la evaluación de un índice de calidad espectral, y otro espacial. Por último se han evaluado diferentes esquemas de fusión utilizando el algoritmo à trous, con objeto de determinar el nivel de degradación de las imágenes fuente requerido para llevar a cabo el proceso de fusión. La calidad espectral y espacial de los distintos esquemas ha sido evaluada y comparada con los algoritmos de fusión basados en Mallat y à trous.

PALABRAS CLAVE: fusión de datos, ERGAS, imágenes multispectrales, wavelet à trous.

ABSTRACT

Lately, different methods for the fusion of multispectral and panchromatic images based on the Wavelet transform have been proposed. Even though, most of them provide satisfactory results, there is one, the algorithm à trous, which presents some advantages against the other fusion methods based on this transform. Thus its implementation is very simple, it only implies elemental algebraic operations, such as products, differences, and convolutions. Moreover it yields a better spatial and spectral quality than the others. On the other hand, it is well known that standard fusion methods do not allow to control the spatial and the spectral quality of the fused image. If the spectral quality is very high, this implies a low spatial quality and vice versa. In this sense, here, it is proposed a new version of a fusion method based on the algorithm à trous, which allows to customize the trade-off between the spectral and the spatial quality of the fused image by the evaluation of two quality indices: one spectral index, the ERGAS index, and other spatial one. For this last one, a new spatial index based on ERGAS concepts translated to the spatial domain has been defined. Moreover, in this work, several different schemes for the computation of the investigated fusion method has been evaluated, in order to determine the optimize degradation level of the source images, required to perform the fusion process. The performances of the proposed fusion method have been compared with the fusion method based on Mallat and à trous algorithms.

KEY WORDS: data fusion, ERGAS, multispectral image, wavelet à trous.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las estrategias de fusión de imágenes de satélite multiresolución, el algoritmo piramidal de Mallat (Mallat, 2000) es uno de los más ampliamente utilizados, debido a la alta calidad espectral que caracteriza a las imágenes resultantes; sin embargo, la naturaleza direccional del proceso de

filtrado, presenta problemas en la fusión de imágenes con un alto contenido de bordes en direcciones diferentes a la horizontal, vertical y diagonal (Candès y Donoho 2000).

En 1987 Dutilleux propuso el algoritmo de Wavelet à trous ("con hoyos"). Este algoritmo tiene dos diferencias fundamentales respecto a los algoritmos de tipo piramidal. Por un lado presenta una inde-

pendencia en la direccionalidad del proceso de filtrado y por otro es redundante, en el sentido de que entre dos niveles de degradación consecutivos, no existe una compresión espacial diádica de la imagen original, si no que se mantiene el tamaño de dicha imagen (Fig. 1).

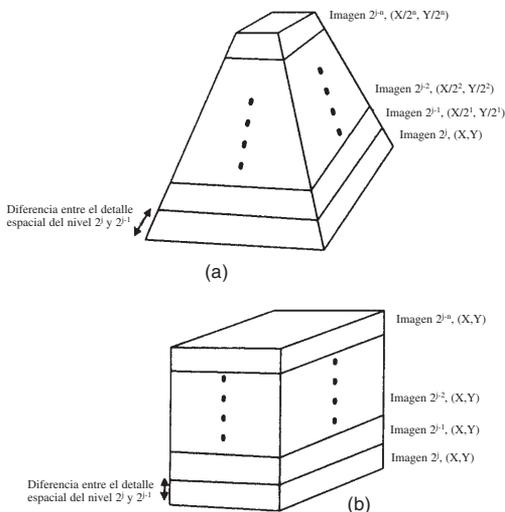


Figura 1. Esquema de degradación para: (a) Algoritmo de Mallat, (b) Algoritmo à trous.

Si bien esto se traduce en un mayor coste computacional de este algoritmo frente al de Mallat, estudios comparativos, presentados en la literatura (Chibani and Houacine, 2003), han mostrado que tanto la calidad espacial como espectral de las imágenes fusionadas mediante el algoritmo à trous es superior a la proporcionada por el algoritmo de Mallat. A pesar de que para ambos métodos de fusión existe un amplia gama de estrategias para integrar la información espacial contenida en la imagen pancromática (PAN), dentro de cada una de las bandas de la imagen multispectral (MULTI), ninguna de estas estrategias permite controlar de una forma objetiva el compromiso entre la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas.

Con objeto de paliar la limitación descrita en el párrafo anterior, en este trabajo, se presenta una nueva aproximación a la fusión de imágenes mediante el algoritmo Wavelet à trous, que establece objetivamente el grado de compromiso entre la calidad espectral y espacial de la imagen resultante mediante curvas características. Estas curvas representan conjuntamente índices de calidad espacial y

espectral, permitiendo obtener imágenes fusionadas adaptadas a los requerimientos del usuario.

Como índice de la calidad espectral de la imagen fusionada, se ha seleccionado el índice ERGAS (Wald, 2000) por su extensivo uso, mientras que para evaluar la calidad espacial, se ha introducido un nuevo índice, inspirado en el anterior, pero definido en el dominio espacial, por lo que se le ha denominado ERGAS espacial. De esta forma, se tienen dos índices que midiendo calidades con un carácter diferente, varían dentro del mismo rango, lo que facilita su representación en un dominio común.

ALGORITMOS DE FUSIÓN

Fusión mediante el algoritmo à trous

La función de escalamiento más usada para el cómputo del algoritmo à trous es la b₃-spline, que se puede representar como el filtro espacial de tamaño 5x5 que se muestra en la siguiente ecuación:

$$h = \frac{1}{256} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Los coeficientes Wavelet se obtienen de la diferencia entre dos niveles consecutivos de degradación, de acuerdo con la ecuación (2):

$$C_{j+1}(x, y) = I_j(x, y) - I_{j+1}(x, y) \quad (2)$$

Para realizar la síntesis de la imagen, desde un nivel de degradación $j+n$, se debe aplicar un criterio aditivo de la sumatoria de todos los coeficientes obtenidos, al último nivel de degradación de la imagen original, como se muestra en la ecuación (3):

$$I_j(x, y) = I_{j+n}(x, y) + \sum_{k=1}^n C_{j+k}(x, y) \quad (3)$$

Si $I_{j+n}(x, y)$ representa los sucesivos planos degradados que contienen la información de baja frecuencia de una imagen original, y $C_{j+k}(x, y)$ sus respectivos coeficientes Wavelet, que contienen la

información de alta frecuencia, entonces es posible plantear un esquema de fusión de imágenes en el que se integre la información de baja frecuencia contenida en una imagen *MULTI*, con la información de alta frecuencia contenida en los coeficientes Wavelet de una imagen de alta resolución espacial (*PAN*), para obtener como resultado una imagen *MULTI* de alta resolución espacial.

Núñez et al. (1999), han propuesto dos metodologías para realizar la fusión de imágenes multiespectrales con imágenes pancromáticas. La primera se denomina método sustitutivo, y consiste en degradar en n planos Wavelet, por medio del algoritmo *à trous*, la imagen *MULTI* previamente re-muestreada al mismo tamaño de la imagen *PAN*, obteniendo así el contenido de baja y alta frecuencia de la imagen multiespectral. De la misma forma, se descompone la imagen *PAN*, obteniendo sus componentes de baja y alta frecuencia. Finalmente se obtiene una imagen fusionada, sustituyendo, en la transformada inversa, los coeficientes $C_{j+k}(x,y)$, de cada banda de la imagen multiespectral, por la sumatoria de los coeficientes Wavelet de la imagen *PAN*. La segunda metodología se denomina aditiva, y supone degradar solamente la imagen *PAN* e integrar la sumatoria de sus coeficientes Wavelet a las diferentes bandas de la imagen *MULTI* original, en la transformada inversa.

Ambas estrategias de fusión presentan dos inconvenientes comunes, el primero es que se integra directamente la información de la imagen *PAN* en la imagen multiespectral, sin considerar las características espectrales particulares de cada banda de esta imagen y el segundo es la imposibilidad de controlar el compromiso inherente entre la calidad espectral-espacial de la imagen fusionada. Con objeto de paliar estos inconvenientes, se han propuesto algunas modificaciones al criterio de fusión basado en el algoritmo *à trous* que se describirán más adelante.

Medición de la calidad de la imagen fusionada

La calidad espectral de las imágenes fusionadas ha sido evaluada mediante el índice conocido como *ERGAS* (*Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse*) (Wald, 2000) y definido por la siguiente ecuación:

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} \left(\frac{RMSE^2(Band_i)}{MULTI_i^2} \right)} \quad (4)$$

Donde h y l representan la resolución espacial de las imágenes *PAN* y *MULTI*, respectivamente; NP es el número de píxeles de la imagen fusionada; $MULTI_i$ es el valor de radiancia de la banda i -ésima de la imagen *MULTI*, y $RMSE$ se define como:

$$RMSE(Band_i) = \frac{1}{NP} \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} (MULTI_i - FUS_i)^2} \quad (5)$$

Dado que en la definición del índice *ERGAS* (4), sólo se consideran las características espectrales de las imágenes fuente a fusionar, se ha propuesto un nuevo índice, con objeto de evaluar la calidad espacial de estas imágenes. Este nuevo índice está inspirado en el *ERGAS* espectral y se ha denotado como *ERGAS* espacial. En su definición se ha incluido un *RMSE* espacial definido como:

$$RMSE(Band_i) = \frac{1}{NP} \sqrt{\sum_{i=1}^{NP} (PAN_i - FUS_i)^2} \quad (6)$$

Donde PAN_i es la imagen obtenida al ajustar el histograma de la imagen *PAN* original al histograma de la banda i -ésima de la imagen *MULTI*.

Fusión ponderada mediante algoritmo *à trous*

El método de fusión ponderada que se propone en este trabajo, se basa en el método de fusión sustitutivo del algoritmo *a'trous* (Núñez et al., 1999). Las modificaciones introducidas en este método de fusión, con objeto de eliminar los inconvenientes mencionados anteriormente, consisten básicamente en establecer un mecanismo que permita controlar el compromiso de calidad espacial-espectral, mediante la introducción de un factor de ponderación de los coeficientes Wavelet de la imagen *PAN*. La ecuación (7) representa, de una manera formal, el algoritmo de fusión propuesto:

$$I_{fus}^i(x, y) = I_{MULTI, j+n}^i(x, y) + \alpha' \sum_{k=1}^W C_{PAN_k}^i(x, y) \quad (7)$$

Donde los índices i y $j+n$ representan el número de bandas y el nivel de degradación de la imagen *MULTI*, respectivamente; y W corresponde al número de planos Wavelet a integrar desde la imagen *PAN*

a la imagen *MULTI*. Para poder realizar una correcta superposición entre ambas imágenes, la imagen *MULTI* debe ser re-muestreada al tamaño de la imagen *PAN*. En la Fig. 2 se representa un esquemático del proceso de fusión ponderada propuesto.

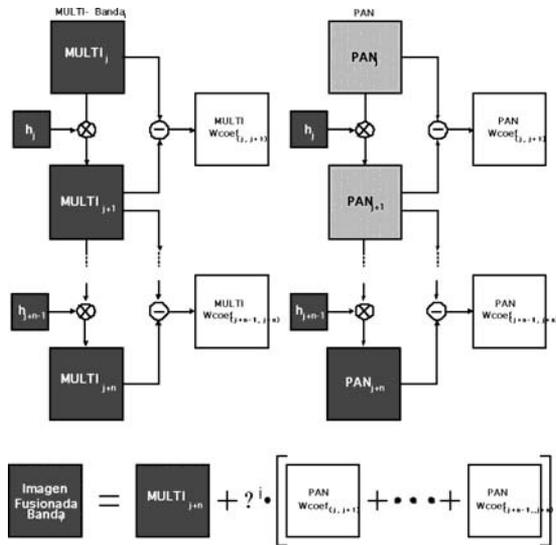


Figura 2. Esquemático del esquema de fusión ponderada.

La determinación de los factores de ponderación de los coeficientes Wavelet de la imagen *PAN*, α^i , se realiza mediante la evaluación simultánea de la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas, mediante los índices *ERGAS* antes definidos, para un rango de valores de α^i que varía entre un 0% y un 200%. Bajo la hipótesis de que el mejor compromiso entre la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas, se consigue cuando sus valores de *ERGAS*, en los correspondientes dominios, son iguales, el mejor valor de α^i , para la banda *i*-ésima de una determinada escena, vendrá dado por el punto de intersección entre la curva de la calidad espectral y la curva de la calidad espacial (Fig. 3) y su valor dependerá exclusivamente de las características de las imágenes fuente.

Con objeto de estudiar la influencia, en la calidad de las imágenes fusionadas, del nivel de degradación de la imagen *MULTI* ($j+n$) donde se lleva a cabo la fusión, así como la cantidad de planos Wavelet (W) integrados (7), se han analizado cinco esquemas de fusión. Las características de cada uno de ellos, así como los resultados obtenidos, serán evaluados en la siguiente sección.

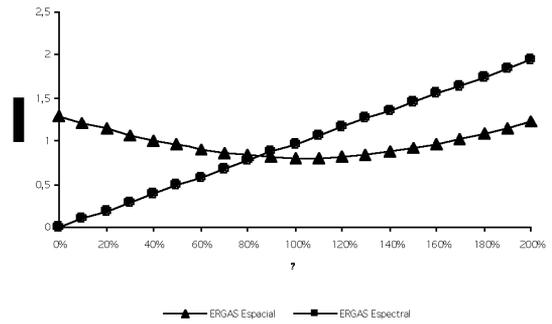


Figura 3. Determinación del valor de α (%) para una banda determinada.

RESULTADOS

Las escenas utilizadas para evaluar el método de fusión ponderada propuesto en este trabajo, así como las características de los diferentes esquemas de fusión, corresponden a imágenes registradas, el día 10 de Marzo de 2000, por los sensores pancromático y multispectral del satélite IKONOS, cuyas características se resumen en la Tabla 1. Su ubicación geográfica es la zona del cajón del Maipo, localizada en las proximidades de Santiago de Chile.

BANDA	RES. ESPECTRAL (NM)	RES. ESPACIAL (M)
PAN	525,8 – 928,5	1
MS-1 (Azul)	444,7 – 516,0	4
MS-2 (Verde)	506,4 – 595,0	4
MS-3 (Rojo)	631,9 – 697,7	4
MS-4 (IrC)	757,3 – 852,7	4

Tabla 1. Características espaciales y espectrales del sensor IKONOS.

La Fig. 4 muestra las imágenes fuente (*MULTI* y *PAN*) correspondientes a esta zona.



Figura 4. (a) Composiciones falso color (R=IrC, G=Verde, B=Azul) de la imagen *MULTI*, (b) Imagen *PAN*.

Como se ha comentado en la sección anterior, se han investigado cinco casos particulares del método de fusión (7) ilustrado en la Fig. (2), analizando la influencia del nivel de degradación de las imágenes fuente en el que se realiza el proceso de fusión, con respecto a la calidad tanto espacial como espectral de las imágenes resultante. Para ello, se considera una relación de resolución espacial entre las imágenes fuente de 4:1, correspondiente a la relación existente entre la resolución espacial de los sensores multispectral (4m) y pancromático (1m) del satélite IKONOS. Esto implica que las imágenes fuente pueden ser degradadas en dos niveles ($j=1$ y $j=2$) y es posible, por lo tanto, obtener dos conjuntos de coeficientes Wavelet, uno que contenga los detalles entre 1m y 2m y otro que contenga los detalles entre 2m y 4m.

La definición de los esquemas sigue una nomenclatura general, en la que el acrónimo WA, corresponde al nombre del método (método de fusión Wavelet *à trous*), y las letras M y P, corresponde a la imagen *MULTI* y *PAN*, con sus respectivos niveles de degradación.

(i) *WA_M_P12*: Se integran los coeficientes Wavelet de la primera degradación de la imagen *PAN*, que contienen los detalles espaciales entre 1m y 2m, directamente a la *i-ésima* banda de la *MULTI*.

(ii) *WA_M_P1224*: Se integran los coeficientes Wavelet de la primera y segunda degradación de la imagen *PAN*, que contienen los detalles espaciales entre 1m y 2m y entre 2m y 4m, respectivamente, directamente a la *i-ésima* banda de la *MULTI*.

(iii) *WA_M12_P12*: Se integra los coeficientes Wavelet de la primera degradación de la imagen *PAN*, que contienen los detalles espaciales entre 1m y 2m en la primera degradación de la *i-ésima* banda de la *MULTI*.

(iv) *WA_M1224_P1224*: Se integran los coeficientes Wavelet de la primera y segunda degradación de la imagen *PAN*, que contienen los detalles espaciales entre 1m y 2m y entre 2m y 4m, respectivamente en la segunda degradación de la *i-ésima* banda de la *MULTI*.

(v) *WA_M12_P1224*: Se integran los coeficientes Wavelet de la primera y segunda degradación de la imagen *PAN*, que contienen los detalles espaciales entre 1m y 2m y entre 2m y 4m, respectivamente en la primera degradación de la *i-ésima* banda de la *MULTI*.

Con objeto de estudiar la calidad tanto espacial como espectral proporcionadas por las cinco configuraciones descritas anteriormente, y basadas en el

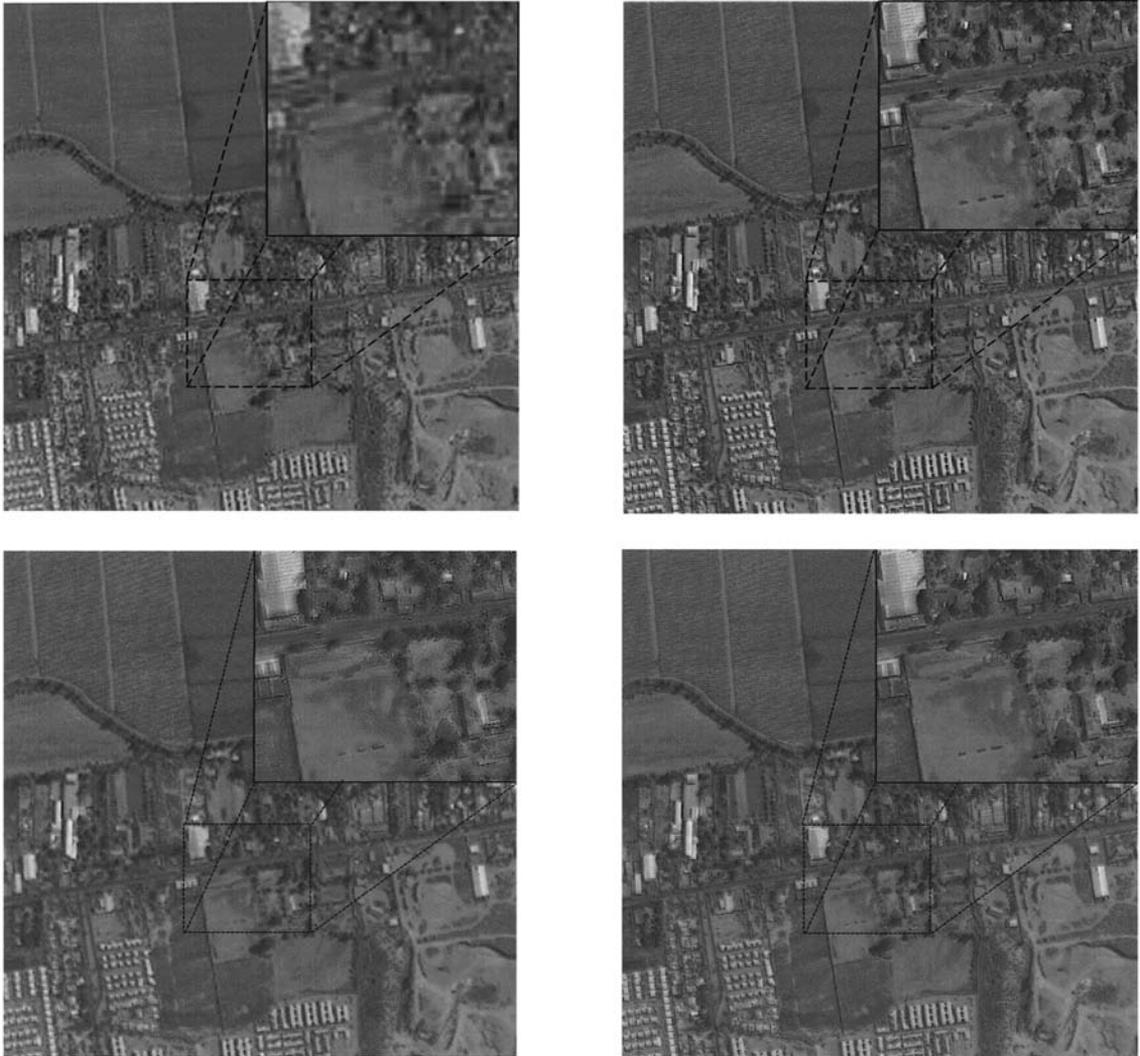
método de fusión ponderada propuesto, se han obtenido imágenes fusionadas, utilizando los valores de α^i determinados por el punto de corte de las curvas características para cada uno de los casos.

La calidad espacial y espectral promedio de las imágenes fusionadas ha sido evaluada objetivamente por medio de los índices *ERGAS* (espacial y espectral). Estos valores así como su valor medio y su correspondiente desviación típica están resumidos en la Tabla 2 ($\alpha \neq 1$), donde además, con objeto de comparar estos resultados con otros métodos de fusión, también se han representado estos mismos valores para imágenes fusionadas mediante el algoritmo *à trous* estándar ($\alpha=1$) y el algoritmo de *Mallat*.

MÉTODO		ESPACIAL	ESPECT.	PROM.	DESV.
WA_M_P12	$\alpha \neq 1$	1,128	1,128	1,128	0,000
	$\alpha = 1$	1,279	0,770	1,025	0,360
WA_M_P1224	$\alpha \neq 1$	1,035	1,036	1,035	0,001
	$\alpha = 1$	1,025	1,079	1,052	0,038
WA_M12_P12	$\alpha \neq 1$	1,075	1,076	1,075	0,000
	$\alpha = 1$	1,094	0,772	0,933	0,228
WA_M1224_P1224	$\alpha \neq 1$	0,914	0,915	0,914	0,001
	$\alpha = 1$	0,874	1,084	0,979	0,149
WA_M12_P1224	$\alpha \neq 1$	0,976	0,977	0,977	0,001
	$\alpha = 1$	0,960	1,081	1,020	0,085
Wavelet <i>Mallat</i>		1,599	1,011	1,305	0,415

Tabla 2. Evaluación de la calidad espectral y espacial de imágenes fusionadas.

Analizando los resultados mostrados en la Tabla 2, se puede observar que la calidad espacial de las imágenes fusionadas mediante el algoritmo de *à trous*, tanto en el caso estándar ($\alpha=1$) como en el ponderado ($\alpha \neq 1$), es superior a la calidad de las imágenes fusionadas mediante el algoritmo de *Mallat*. Sin embargo, no en todos los casos estudiados, la calidad espectral de las imágenes obtenidas mediante *à trous* supera a las de *Mallat*. No obstante, y dado que se está buscando un compromiso entre la calidad espacial y espectral de las imágenes fusionadas, es preciso hacer notar, que las estrategias basadas en el algoritmo *à trous*, proporcionan en todos los casos un valor promedio de los índices *ERGAS* inferior, además de reducir notablemente los valores de desviación estándar. De hecho, para el caso de $\alpha \neq 1$ son cercanos a cero, en los cinco esquemas estudiados. En



*Figura 5. Composiciones falso color (R=IrC, G=Verde, B=Azul) para: (a) Imagen *MULTI* (original), (b) *WA_M_P1224* con $\alpha=1$, (c) *WA_M12_P12* con $\alpha=1$, (d) *WA_M1224_P1224* con $\alpha \neq 1$.

este sentido, se puede afirmar que el método propuesto proporciona un compromiso de calidad espectral-espacial de las imágenes fusionadas, mejor que los otros dos métodos estudiados.

Los valores de *ERGAS*, tanto espacial como espectral, obtenidos para las cinco estrategias investigadas, muestran que si bien, para el caso *WA_M12_P12* con $a=1$, se consigue la mayor calidad espectral y para el caso *WA_M_P1224* con $a=1$, la mayor calidad espacial, el valor promedio más bajo y con una menor desviación estándar, se consigue para *WA_M1224_P1224* con $a \neq 1$. Esto implica que de

todas las estrategias analizadas, ésta es la que establece el mejor compromiso de calidad espectral-espacial.

En la Fig. 5 se muestran composiciones en falso color (R=IrC, G=Verde, B=Azul) de la imagen original (Fig. 5 (a)) y de las imágenes fusionadas para los casos en que se obtiene la mejor calidad espacial, *WA_M_P1224* con $a=1$ (Figura 5(b)), la mejor calidad espectral *WA_M12_P12* con $a=1$ (Fig. 5 (c)) y el mejor compromiso de calidad espacial-espectral *WA_M1224_P1224* con $a \neq 1$ (Figura 5(d)). Además, con el objetivo de posibilitar una mejor comparación entre las cuatro imágenes, se incluyen acerca-

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

miento de una zona en particular de la escena bajo análisis. En la Fig. 5 (b) se puede observar una alta calidad espacial, pero una baja calidad espectral que se manifiesta en el alto contraste de colores, debido a la información aportada por la imagen PAN. Por el contrario, en la Fig. 5 (c) se aprecia un bajo contraste, lo que perjudica su calidad espacial, pero tiene un alto contenido espectral proveniente de la MULTI. Finalmente, en la Fig. 5 (d) se aprecia claramente el equilibrio entre la calidad espacial y espectral de las imágenes fuente.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una metodología para determinar de una manera objetiva, las curvas características que permiten estimar, de una manera gráfica, el compromiso entre la calidad espacial y espectral de una imagen fusionada. Para ello, se ha propuesto un nuevo criterio de fusión que pondera, mediante un factor " α ", los coeficientes de la imagen PAN a fusionar mediante el algoritmo Wavelet à trous. Las características de la imagen resultante quedan condicionadas al interés del usuario por disponer de una imagen de muy alta calidad espectral, muy alta calidad espacial o con ambas calidades equilibradas.

Esta metodología se ha utilizado para determinar el nivel de degradación en el que se debe realizar la fusión, con objeto de minimizar factores ruidosos implícitos a este proceso (re-muestreo de la imagen MULTI).

BIBLIOGRAFÍA

- CANDÈS, E. J. and DONOHO, D. L. 2000, Curvelets, Multiresolution Representation, and Scaling Laws, *Wavelet Applications in Signal and Image Processing VIII*, A. Aldroubi, A. F. Laine, M. A. Unser eds., Proc. SPIE 4119.
- CHIBANI, Y. and HOUACINE, A. 2003, Redundant versus orthogonal Wavelet decomposition for multisensor image fusion, *Pattern Recognition*. 36: 879-887.
- DUTILLEUX, P. 1987. An implementation of the "algorithme à trous" to compute the wavelet transform. In *Compt-rendus du congrès ondelettes et méthodes temps-fréquence et espace des phases*, Springer-Verlag. 298-304.
- MALLAT, S. 2000. *A Wavelet tour of signal processing*. 2nd edition, Academic Press, Elsevier.
- NÚÑEZ, J., OTAZU, X., FORS, O., PRADES A., PALÁ, V. and ARBIOL, R. 1999, Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE. 37(3): 1204-1211.
- WALD, L. 2000. Quality of high resolution synthesized: is there a simple criterion?, *International Conference on Fusion of Earth Data*, France, pp: 99-105.

