

# Influencia del nivel de degradación en la calidad de imágenes IKONOS fusionadas mediante el algoritmo à trous

M. Lillo-Saavedra\* y C. Gonzalo\*\*  
malillo@udec.cl

\*Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.  
Departamento de Mecanización y Energía, Chile.

\*\*Universidad Politécnica de Madrid, Facultad de Informática, DATSI, España

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es investigar la dependencia de la calidad espacial-espectral de las imágenes fusionadas, aplicando la transformada Wavelet mediante el algoritmo à trous estándar y ponderado, respecto al nivel de degradación al que se deben someter las imágenes fuente. Se han utilizado los índices ERGAS espacial y espectral de las imágenes fusionadas para determinar el nivel de degradación que proporciona las "mejores" imágenes fusionadas. Los resultados obtenidos han mostrado que para un valor de  $n$  adecuado, el método ponderado proporciona imágenes de mejor calidad y con un compromiso más alto entre la calidad espacial y espectral que el método estándar. Por otro lado, el estudio de la variación de la entropía de las imágenes fuente y fusionadas, ha mostrado que un elevado número de degradaciones, no proporciona necesariamente imágenes fusionadas con un contenido mayor de información.

PALABRAS CLAVE: Fusión de datos, ERGAS, Imágenes Multiespectrales, Wavelet, à trous.

## ABSTRACT

The influence of the source images degradation level in the spatial-spectral quality of fused image through the Wavelet à trous algorithm has been investigated in this work. Spatial and spectral ERGAS indices of fused images have been used to determine the degradation level that provides the "best" fused images. Obtained results have shown that the weighted method gives fused images with a high spatial-spectral quality and trade-off, than the standard method, for an adequate value of  $n$ . On the other hand, the entropy evaluation, for different  $n$  values, of source and fused images, has shown that a high number of degradation, necessarily does not provide images fused with a greater content of information.

KEY WORDS: Data Fusion, ERGAS, Multispectral Images, Wavelet 'atrous.

## INTRODUCCIÓN

El algoritmo piramidal de Mallat (TDWM) (Mallat 1999) es uno de los más ampliamente utilizados dentro de las estrategias de fusión de imágenes de satélite. Ello es debido a la alta calidad espectral que caracteriza a las imágenes obtenidas mediante este método; sin embargo, la naturaleza direccional del proceso de filtrado y su carácter decimado, presenta algunos problemas en la fusión de imágenes como la aparición del efecto diente de sierra que deteriora notablemente la calidad espacial de las imágenes fusionadas (Candès y Donoho 2000, Zhang 2002).

Dutilleux (1987) propuso el algoritmo basado en la transformada de Wavelet, calculada mediante el algoritmo à trous ("con hoyos") (TWA). Este algoritmo tiene dos diferencias fundamentales respecto a los algoritmos de tipo piramidal. Por un lado presenta una independencia 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.

Desde el punto de vista de su implementación, el algoritmo TWA es muy simple, dado que únicamente implica operaciones algebraicas elementales, tales como productos, sumas y diferencias. 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 (Lillo-Saavedra *et al.* 2005). Si la calidad espectral de una imagen obtenida mediante una estrategia de fusión es muy alta, esto implica una baja calidad espacial y vice versa. En este sentido, Gonzalo y Lillo-Saavedra (2004) propusieron una nueva versión ponderada de la estrategia de fusión basada en el algoritmo *à trous* que permite establecer un compromiso objetivo entre la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas.

La fusión de imágenes mediante técnicas multiresolución implica la selección del número de planos Wavelet, provenientes de la imagen pancromática que deben ser integrados en el *n*-ésimo nivel de degradación de la imagen multispectral, para así obtener imágenes fusionadas con calidad espacial y espectral altas y equilibradas. Gonzalo y Lillo-Saavedra (2004) han propuesto y analizado cinco esquemas de fusión diferentes con objeto de estudiar la influencia del nivel de degradación, *n*, de las imágenes fuentes, así como del número de planos Wavelet (*W*) que se integran, en la calidad de dichas imágenes fusionadas. Los resultados obtenidos en el citado estudio, para los cinco esquemas considerados, han mostrado que cuando ambas imágenes fuente se degradan el mismo número de niveles, se obtiene imágenes fusionadas con un muy buen equilibrio entre su calidad espacial y espectral.

Partiendo de esta idea, la cuestión que queda por resolver es cuántas veces se deben degradar las imágenes fuente para optimizar el resultado del proceso de fusión, logrando imágenes de muy alta calidad espacial y espectral, manteniendo, a su vez, el mejor compromiso entre ellas. El objetivo de este trabajo es investigar la dependencia de la calidad espacial-espectral de las imágenes fusionadas mediante el algoritmo *à trous*, estándar y ponderado (Núñez *et al.* 1999, Gonzalo y Lillo-Saavedra 2004), respecto al nivel de degradación de las imágenes fuente.

## METODOLOGÍA

El método de fusión que se ha utilizado en este trabajo se representa de una forma general mediante la ecuación (1) (Gonzalo y Lillo 2004):

$$I_{Fus}^i(x, y) = I_{MULTI}^i(x, y) + \alpha \sum_{k=1}^W C_{PAN_k}^i(x, y) \quad (1)$$

Donde, los índices *i* y *j+n* representan el número de bandas y el nivel de degradación de la imagen multispectral (*MULTI*), respectivamente; *W* corresponde al número de planos

Wavelet a integrar desde la imagen pancromática (*PAN*) a la imagen *MULTI*;  $C_{PAN_k}^i(x, y)$  son los coeficientes Wavelet de la imagen *PAN*; y  $\alpha^i$  es el factor de ponderación de dichos coeficiente, en particular para  $\alpha^i = 1$ , se tiene el algoritmo clásico de fusión basado en la transformada Wavelet, mediante el algoritmo *à trous*, y para  $\alpha^i \neq 1$ , este mismo algoritmo, pero ponderado. La ponderación de la información aportada por la imagen *PAN* a la imagen *MULTI*, permite controlar de una forma objetiva el compromiso entre la calidad espacial y espectral de la imagen resultante del proceso de fusión. La Figura 1 representa un esquemático de este proceso.

Inicialmente, se ha evaluado la calidad espacial y espectral de las imágenes fusionadas, así como el

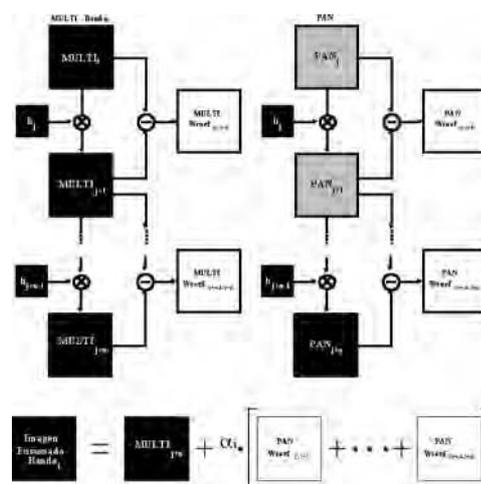


Figura 1. Esquemático del proceso de fusión mediante el algoritmo *à trous*: clásico  $\alpha=1$  y ponderado ( $\alpha \neq 1$ )

compromiso entre ellas, para los dos métodos de fusión considerados y para diferentes valores de *n*. Para ello, se han calculado los correspondientes índices *ERGAS*. El *ERGAS* espectral (Wald 2002), definido como:

$$ERGAS_{espectral} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N^{\circ} Bandas} \sum_{i=1}^{N^{\circ} Bandas} \left( \frac{RMSE_{aproximada}(Banda_i)}{(MULTI_i)^2} \right)^2} \quad (2)$$



**Figura 2.** Imágenes fuente: a) Composición NGB de la imagen multispectral e b) imagen pancromática

Donde  $h$  y  $l$  son las resoluciones espaciales de la imágenes fuente, *MULTI* y *PAN*, respectivamente. Empíricamente, se ha demostrado que un valor de *ERGAS* menor que tres indica que la calidad de la imagen fusionada es buena (Wald 2002).

La definición del *ERGAS* espacial (Lillo *et al.* 2005), está inspirada en el *ERGAS* espectral, y se muestra en la ecuación (3):

$$ERGAS_{\text{espacial}} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N^{\text{o}} \text{ Bandas}} \sum_{i=1}^{N^{\text{o}} \text{ Bandas}} \left( \frac{RMSE_{\text{espacial}}(Banda_i)}{(PAN_i)} \right)^2} \quad (3)$$

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* y  $RMSE_{\text{espacial}}$  se define como:

$$RMSE_{\text{espacial}}(Band_i) = \frac{1}{NP} \sqrt{\sum_{k=1}^{NP} (PAN_i(k) - FUS_i(k))^2} \quad (4)$$

Dado que un mayor valor de  $n$  supone una mayor degradación de las imágenes fuentes a fusionar, cabría esperar que la calidad espectral de las imágenes fusionadas disminuyera a medida que  $n$  va aumentando y contrariamente, la calidad espacial fuera aumentando. En este sentido, se puede presumir la existencia de un valor de  $n$  en el que la calidad espacial y espectral se igualarán. Lo cual, a *priori*, se puede considerar como un buen compromiso entre la calidad espacial y espectral de la imagen final fusionada. Sin embargo, esto solo será cierto en el caso de  $\alpha^i = 1$  ya que para  $\alpha^i \neq 1$  este “buen” compromiso se debería mantener para todos los valores de  $n$ . Por lo tanto lo que habrá que deter-

minar es el valor de  $n$  para el cual el valor promedio de los índices sea el menor, con una desviación también mínima.

Por otro lado, se propone evaluar la entropía de las imágenes fusionadas, de las *MULTI* degradadas y del promedio de los coeficientes de la imagen *PAN*, utilizados en el proceso de fusión, para el caso de  $\alpha^i = 1$  y  $\alpha^i \neq 1$  con objeto de investigar como varía la cantidad de información de la imagen fusionada respecto a la cantidad de información aportada por las imágenes fuentes para diferentes niveles de degradación.

## RESULTADOS

La metodología descrita en la sección anterior se ha aplicado a una escena de 1600 m<sup>2</sup> de las imágenes registradas el día 10 de Marzo de 2000, por los sensores pancromático y multispectral del satélite IKONOS. Geográficamente se ubica en la zona del cajón del Maipo, localizada en las proximidades de Santiago de Chile. Una composición color de las bandas N, G, y B de la imagen *MULTI* original, se muestra en la Figura 2 a) y la correspondiente imagen *PAN* en la Figura 2 b).

Con objeto de determinar el nivel de degradación para el cual se obtienen las imágenes fusionadas con mejor calidad, se han realizado numerosos experimentos de fusión, para  $\alpha^i = 1$  y  $\alpha^i \neq 1$  variando  $n$  desde 1 hasta 10. Se han evaluado los índices *ERGAS*, tanto espacial como espectral de todas las

imágenes fusionadas y se han representado en un dominio común, frente al nivel de degradación.

En la Figura 3, se muestran los resultados obtenidos para  $\alpha^i=1$ .

Como ya se había anticipado, se puede observar en la Figura 3 que a medida que aumenta el nivel de degradación,  $n$ , la calidad espectral de las imágenes fusionadas va disminuyendo, a la vez que aumenta su calidad espacial. También se puede observar que el valor de  $n$  para el cual los valores de los índices

espaciales y espectrales son más próximos, y consecuentemente la desviación entre ellos es mínima (0,0499), es para  $n=2$ , siendo, en este caso, el valor promedio de los índices igual a 1,1742.

Experimentos similares a los descritos anteriormente, se han realizado para el método *à trous* ponderado ( $\alpha^i \neq 1$ ). En este caso ha sido preciso determinar previamente para cada banda a fusionar y para cada valor de  $n$ , los valores de  $\alpha^i$  (Gonzalo & Lillo, 2004). Estos valores se muestran en la Tabla 1.

Banda	Nivel de Degradación									
	n=1	n=2	n=3	N=4	n=5	n=6	n=7	n=8	n=9	n=10
B1	1,7573	0,9217	0,7035	0,6193	0,5796	0,5574	0,5428	0,5318	0,5227	0,5149
B2	1,7658	0,9020	0,6762	0,5900	0,5507	0,5285	0,5134	0,5018	0,492	0,4833
B3	1,9504	0,9695	0,7051	0,6035	0,5563	0,5289	0,5101	0,4956	0,4837	0,4730
B4	1,4585	1,0229	0,7281	0,6201	0,5716	0,5457	0,5297	0,5186	0,5098	0,5019

Tabla 1. Valores de  $\alpha^i$  para el método de fusión ponderado.

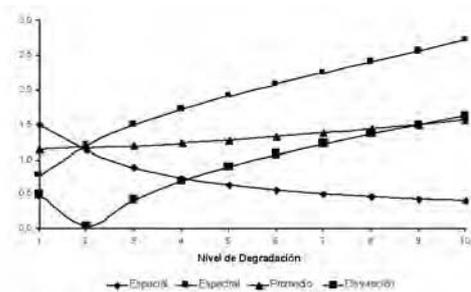


Figura 3: Variación de los índices de calidad ERGAS (espacial y espectral), de su valor promedio y desviación típica para  $\alpha^i=1$ .

En la Tabla 2, se muestran los índices ERGAS, tanto espacial como espectral, así como su valor medio y desviación típica para todas las imágenes fusionadas con  $\alpha^i \neq 1$ .

n	Espacial	Espectral	Promedio	Desviación
1	1,4774	1,3876	1,4325	0,0635
2	1,1536	1,1545	1,1541	0,0006
3	1,0512	1,0521	1,0517	0,0006
4	1,0458	1,0466	1,0462	0,0006
5	1,0774	1,0788	1,0781	0,0010
6	1,1235	1,1247	1,1241	0,0009
7	1,1745	1,1753	1,1749	0,0006
8	1,2267	1,2273	1,2270	0,0004
9	1,2790	1,2797	1,2794	0,0005
10	1,3323	1,3329	1,3326	0,0004

Tabla 2. Valores de ERGAS para el método ponderado.

El análisis de los valores representados en la Tabla 2, indica que para valores  $n$  superiores a 1, se obtienen imágenes fusionadas con un compromiso muy alto entre su calidad espacial y espectral, como queda reflejado en sus desviaciones correspondientes muy próximas a cero (Figura 4).

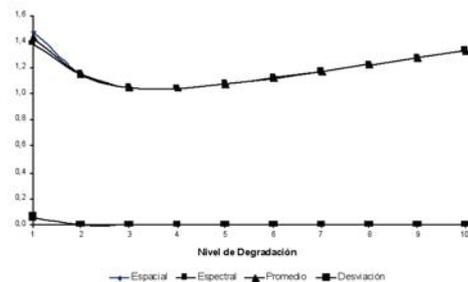


Figura 4. Variación de los índices de calidad ERGAS (espacial y espectral), de su valor promedio y desviación típica para  $\alpha^i \neq 1$ .

$\alpha$	n	ERGAS			
		Espacial	Espectral	Promedio	Desviación
1	2	1,1389	1,2095	1,1742	0,0499
$\neq 1$	4	1,0458	1,0466	1,0462	0,0006

Tabla 3. Comparación de las características de las “mejores imágenes fusionadas” para  $\alpha^i=1$  y  $\alpha^i \neq 1$ .

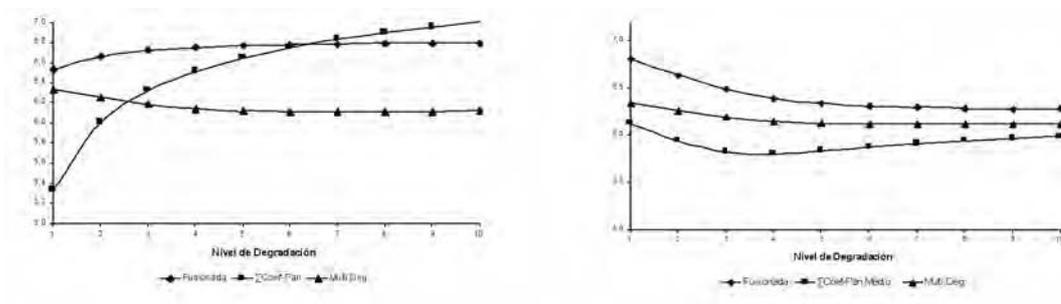
Además, se debe hacer notar, que para  $2 \leq n \leq 6$  las imágenes fusionadas mediante este método tienen valores de *ERGAS* promedio inferiores al obtenido con el método estándar. El valor de *ERGAS* promedio mínimo se ha obtenido para  $n=4$ , con una desviación estándar cercana a cero (0,0006), siendo por tanto, este nivel de degradación, el que proporcionaría la imagen fusionada de mejor calidad espacial-espectral simultáneamente.

En la Tabla 3 se han incluido los valores de los índices espaciales y espectrales para las “mejores imágenes fusionadas”, para  $\alpha^i=1$  y  $\alpha^i \neq 1$ . El análisis de estos valores muestra que las características espaciales y espectrales de la imagen fusionada mediante el método ponderado son superiores a la fusionada mediante el método estándar. Además, la fusión mediante el método ponderado admite un número mayor de degradaciones, sin que ello implique un deterioro de la calidad espectral de las imágenes fusionadas. Por otro lado, el valor de desviación obtenido, en este caso, confirma el mejor equilibrio entre la calidad espacial y espectral proporcionado por este método.

Los resultados obtenidos al evaluar la variación de la entropía de las imágenes fusionadas, y las

imágenes fuente respecto al nivel de degradación,  $n$ , se muestran en la Figura 5 a) y b). Se puede observar que para el caso del algoritmo *à trous* estándar (Figura 5 (a)), la cantidad de entropía aportada por la PAN a la imagen fusionada, aumenta con  $n$ , mientras que en el caso ponderado (Figura 5 (b)), esta cantidad disminuye en los primeros niveles, hasta  $n=4$ , aumentando a partir de este valor. En este último caso, este comportamiento es debido a la ponderación de los coeficientes Wavelet de la PAN (Tabla 1). Otro aspecto a señalar en la Figura 5, es la baja variación que presenta la entropía de las imágenes fusionadas, en los dos casos estudiados y para valores de  $n$  superiores a 4. Es decir, aun cuando se llevara a cabo un número mayor de niveles de degradación, ello no implicaría un aumento significativo en la cantidad de información contenida en las imágenes fusionadas.

En la Figura 6 a), b), c), d) y e) se han incluido las composiciones N, G, y B de las imágenes fusionadas para  $\alpha^i=1$  y  $\alpha^i \neq 1$  y para  $n=2, 3$  y 4. Se puede observar como el mejor compromiso entre la calidad espacial y espectral se obtiene para  $n=4$  y  $\alpha^i \neq 1$ .



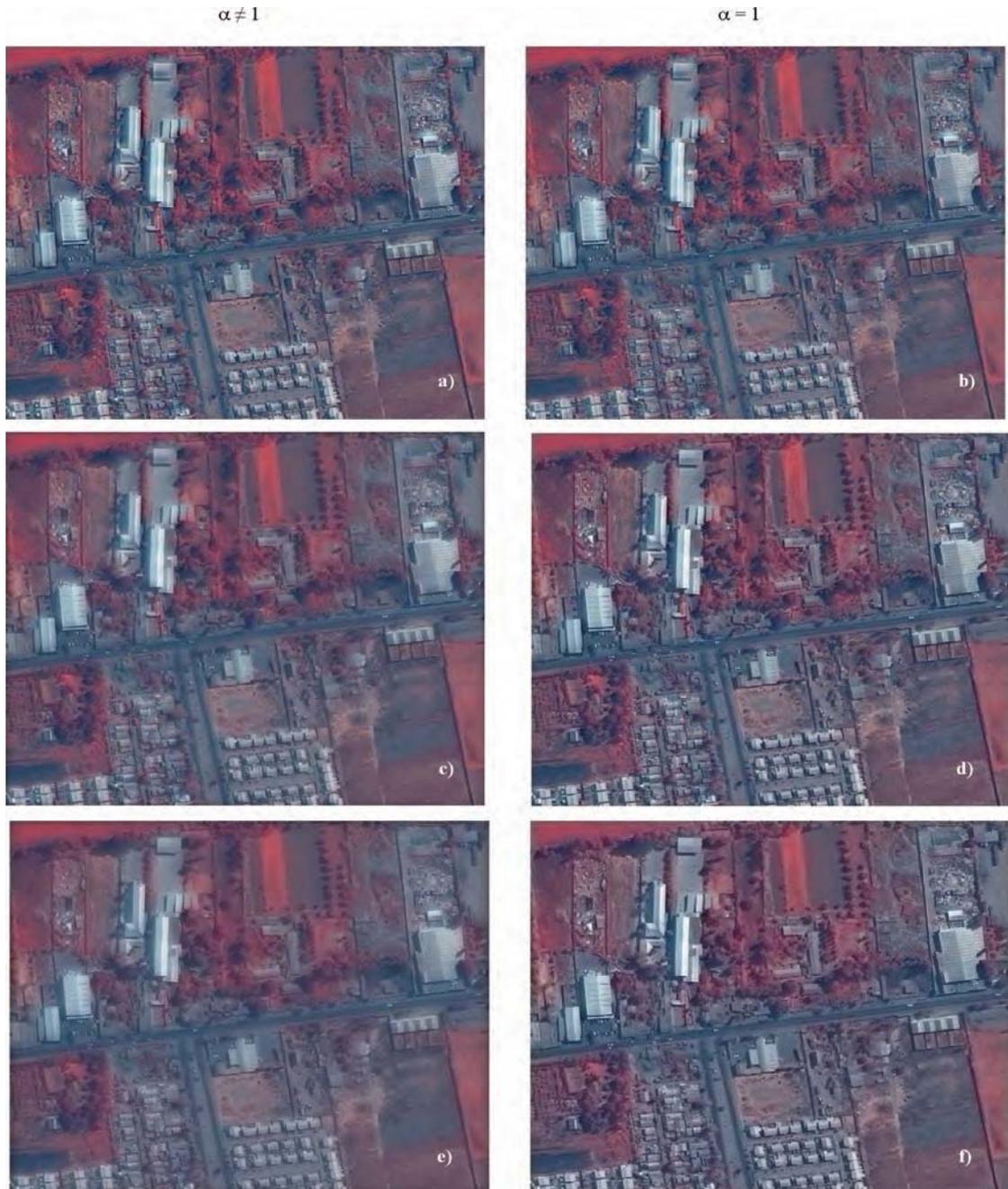
**Figura 5:** Variación de la entropía de la imagen fusionada, de la imagen MULTI degradada y del promedio acumulado de los coeficientes de la imagen PAN, con  $n$  para a)  $\alpha^i=1$  y b)  $\alpha^i \neq 1$ .

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia del nivel de degradación al que se someten las imágenes fuentes para obtener una imagen fusionada mediante la transformada Wavelet calculada con el algoritmo *à trous* estándar ( $\alpha^i=1$ ) y ponderado ( $\alpha^i \neq 1$ ), en la calidad final de esta imagen.

La determinación del nivel de degradación que proporcione las imágenes fusionadas con un mejor compromiso entre su calidad espacial y espectral, se

ha llevado a cabo mediante la medida de los correspondientes índices *ERGAS*. Los resultados obtenidos muestran que el método de fusión ponderado permite llevar a cabo un mayor número de degradaciones que el método estándar, lo cual implica un aumento de la calidad espacial de las imágenes fusionadas, sin degradar su calidad espectral. Por lo que las imágenes fusionadas obtenidas mediante el método ponderado presentan características espaciales y espectrales superiores al método estándar y sobre todo con un mayor compromiso entre ellas.



\*Figura 6. Composiciones N, G, B de imágenes fusionadas mediante el algoritmo *à trous* ponderado ( $\alpha^i \neq 1$ ) y sin ponderación ( $\alpha^i = 1$ ) y para  $n$  igual a 2 (a,b), 3 (c,d) y 4 (e,f).

\* Todas la figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color.

Aún cuando de una forma intuitiva un mayor nivel de degradación supondría aumentar la cantidad de información que procedente de la PAN se inyectaría a la MULTI, el estudio de la variación de la entropía de las imágenes fusionadas con respecto a su nivel de degradación, ha mostrado que para la escena objeto de estudio, en el caso del método estándar, esto es cierto hasta un nivel de degradación  $n=4$ , a partir del cual, la variación de la cantidad de información de la imagen fusionada es insignificante. Por otro lado, para el método ponderado, se ha observado que la variación de la entropía de la imagen fusionada está determinada por el criterio de ponderación, que da lugar a una disminución de la misma en los primeros niveles de degradación, mostrando en los siguientes niveles un comportamiento similar al observado para el método estándar.

Desde el punto de vista de los autores, se deben realizar experimentos con diferentes tipos de imágenes con objeto de generalizar las conclusiones presentadas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo bajo la financiación de las Universidades Politécnica de Madrid y Concepción de Chile, a través de los Proyectos AL2004-1001-2.55 y DIUC 204.131.007-1.0.

## REFERENCIAS

- CANDÈS, E. J. y 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.
- MALLAT, S., 1999, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2nd ed., Academic Press, Elsevier.
- NÚÑEZ, J., OTAZU, X., FORS, O., PRADES A., PALÁ, V y ARBIOL, R., 1999, Multiresolution-Based Image Fusion with Additive Wavelet Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 1204-1211.
- GONZALO, C., y LILLO, M., 2004, *Customized Fusion of Satellite Images Based on a New à trous Algorithm*, in Image and Signal Processing for Remote Sensing X, Editor Lorenzo Bruzzone, SPIE, Bellingham, WA, Vol. 5573, 444-451.
- GONZALO, C., y LILLO, M., 2004, Control de la calidad espacial y espectral de imágenes de satélite fusionadas mediante el algoritmo wavelet à trous, *Revista de Teledetección*, 22, 47-53.
- DUTILLEUX, P., 1987, An Implementation of the Algorithm à trous to Compute the Wavelet Transform, *Compt-rendus du congrès ondelettes et méthodes temps-fréquence et espace des phases*, Marseille, Springer-Verlag, 298-304.
- LILLO, M., GONZALO, C., ARQUERO, A. y MARTÍNEZ, E., 2005, Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Imagery Based on Tailored Filtering in the Fourier Domain, *International Journal of Remote Sensing*, ELSEVIER, 26: 1263-1268.
- WALD, L., 2002, *Data Fusion, Definition and Architectures: Fusion of Image of Different Spatial Resolution*, Le Presses de l'École des Mines, Paris.
- ZHANG, Y., 2002, Problems in the Fusion of Commercial High-Resolution Satellite images as well as Landsat 7 Images and Initial Solution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, 34, Part4.