

FUSIÓN MEDIANTE WAVELETS DE IMÁGENES SPOT-PAN Y DEL SATELÍTE TAILANDES TMSAT

O. FORS (*,**), X. OTAZU (*,**,***), y J. NÚÑEZ (*,**)

ofors@am.ub.es

(*) Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franquès, 1, 08028 Barcelona.

(**) Observatori Fabra. Camí de l'Observatori S/N, 08035 Barcelona.

(***) Centre de Visió per Computador, Universitat Autònoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallès, 08193 Barcelona.

RESUMEN: Se expone una nueva aplicación de nuestro método de fusión por wavelets (Núñez *et alii*. 1999a,b). Esta vez, mientras que los datos de alta resolución siguen correspondiendo a SPOT-PAN, la información multiespectral de baja resolución se obtiene a partir de los datos del satélite tailandés TMSAT. Se realiza una comparativa, cualitativa y cuantitativa, del método propuesto con algoritmos clásicos de fusión (IHS y LHS). Como resultado, nuestro método muestra un comportamiento superior en la preservación de la información multiespectral cuando la resolución de la imagen se incrementa. Finalmente, se exponen diferentes aplicaciones de la fusión para el tipo de datos estudiado.

ABSTRACT: A new application of our wavelet-based fusion method (Nuñez *et alii*. 1999a,b) is exposed. This time, while we still adopt SPOT-PAN as high-resolution data, low-resolution multispectral information is obtained from thailandese satellite TMSAT. A qualitative and quantitative comparison of proposed method with classical fusion algorithms (IHS and LHS) is performed. As a result, our method shows superior performance preserving multispectral information while increasing image resolution. Finally, different applications of fusion for this particular imagery are exposed.

Palabras clave: fusión, wavelets, resolución espacial, resolución espectral.

INTRODUCCIÓN

Es una situación habitual en muchas disciplinas observacionales que exista cierta especialización entre los datos suministrados por los diferentes sensores disponibles para el estudio de una determinada escena.

En el caso concreto de la Teledetección, típicamente hay dos especificaciones que suelen ser características de un sensor: la resolución espacial y la resolución espectral. Debido a limitaciones instrumentales, existe en general una relación inversa entre ambas especificaciones, de manera que un sensor con alta resolución espectral (número elevado de bandas) no suele tener una resolución espacial óptima, y viceversa. Esta dicotomía en la resolución de los datos acarrea consigo una incompletitud inherente para cualquier estudio que se realice a posteriori.

La fusión de datos nace de la necesidad de solucionar la problemática expuesta anteriormente. Aunque el concepto de fusión puede ser mucho más general y aplicable a cualquier tipo de datos (no sólo imágenes), nosotros restringiremos nuestra discusión a este últimos

caso. La idea principal se basa en extraer la información de alta frecuencia espacial presente en una imagen de alta resolución (generalmente pancromática) e incorporarla en la imagen multiespectral de baja resolución. Más concretamente, lo que se pretende es que tal aportación de detalles de alta frecuencia se produzca de la manera más inocua posible para el contenido multiespectral de la imagen original. Interesa, por tanto, incrementar resolución espacial pero conservando intactas las características multiespectrales.

Se han propuesto diversos algoritmos de fusión de imágenes (Chavez *et al.*, 1991) la mayoría de ellos dentro del marco de las transformaciones de color (IHS y LHS). Sin embargo, éstos han demostrado causar una degradación espectral significativa, sobretodo cuando las dos imágenes a fusionar no han sido captadas en el mismo instante de tiempo. Como respuesta a la necesidad de algoritmos con una mejor preservación de la información multiespectral de la imagen de baja resolución, se han desarrollado en los últimos años una serie de soluciones basadas en el análisis multiresolución.

Aquéllos basados en la transformada wavelet bidimensional discreta han demostrado ser particularmente exitosos (Yocky, 1996), (Núñez *et alii*, 1997), (Ranchin *et alii*, 1997), (Zhou *et alii*, 1998) y (Núñez *et alii*, 1999a,b).

MÉTODOS DE FUSIÓN STANDARD

La mayoría de algoritmos de fusión standard están basados en la transformación de una imagen color representada en un modelo **RGB** (Red, Green, Blue), a uno del tipo **IHS** (**I**=intensidad, **H**=matiz, **S**=saturación). En general, la intensidad da idea del brillo total del color, el matiz de cuán puro es un color, mientras que la saturación describe el grado en que el color se diluye con la luz blanca. El esquema seguido para fusionar dos imágenes, una pancromática de alta resolución (PAN-AR) y otra multispectral de baja resolución (ME-BR), es el siguiente:

- 1) asegurar que ME-BR y PAN-AR sean superponibles, mediante un remuestreo de ME-BR, toma de puntos de control en ambas imágenes y ajuste de un polinomio cúbico de deformación global.
- 2) transformar las componentes **R**, **G** y **B** de ME-BR en **I**, **H** y **S**.
- 3) modificar el histograma de PAN-AR, mediante una especificación del histograma, donde la imagen de referencia es la componente **I** de ME-BR. De esta manera, se consigue que el histograma de PAN-AR específica (PAN-AR-E) se asemeje al de la ME-BR. En términos de descriptores estadísticos ésto equivale a forzar que la media y varianza de ambas imágenes sean parecidas.
- 4) reemplazar la componente **I** de ME-BR por PAN-AR-E, y realizar la transformación **IHS** inversa, para obtener las componentes **R**, **G** y **B** de la imagen fusionada.

Dentro de este procedimiento general, lo que caracteriza a cada uno de los métodos de fusión standard es la definición de la componente de intensidad:

$$I = \max(\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$L = \frac{\mathbf{R} + \mathbf{G} + \mathbf{B}}{3} \quad (2)$$

$$L' = \frac{\max(\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}) + \min(\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B})}{2} \quad (3)$$

Y de acuerdo esas definiciones nos referiremos en adelante a los métodos de fusión **IHS**, **L'HS** y **LHS**. Como ya se remarcó en (Núñez *et alii*, 1999a,b), la fusión mediante **L** es preferible, ya que reparte de manera proporcional entre las componentes (**R,G,B**) cualquier incre-

mento que se realice sobre la componente de intensidad.

Como se observa en 4), los métodos de fusión standard hacen uso del hecho que las transformaciones **IHS** logran desacoplar la información espectral en dos componentes **H** y **S** y aíslan en la componente **I** gran parte de la información en resolución espacial. Esta afirmación es parcialmente cierta, ya que cualquiera de las tres transformaciones anteriores son capaces de representar sólo un número limitado de colores (gamut) o combinaciones (**R,G,B**) (Smith, 1978).

DESCOMPOSICIÓN POR WAVELETS

La transformada wavelet continua de una función arbitraria $f(t)$ viene dada por la expresión:

$$W(f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

donde a y b son parámetros de escala y traslacionales.

Cada función base $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ es una versión escalada y trasladada de la función wavelet madre ψ .

El algoritmo de descomposición en wavelets utilizado es el «à trous» («con agujeros») (Starck y Murtagh 1994). Dada una imagen \mathbf{p} se construye una secuencia de aproximaciones de dicha imagen:

$$F_1(\mathbf{p}) = \mathbf{p}_1, \quad F_2(\mathbf{p}_1) = \mathbf{p}_2, \quad F_i(\mathbf{p}_{i-1}) = \mathbf{p}_i, \quad (i=1, \dots, n)$$

Cada \mathbf{p}_i se consigue mediante la convolución de \mathbf{p}_{i-1} con un filtro diseñado a partir de una función de escala (en este caso una B_3 spline cúbica). De las diferencias entre sucesivas aproximaciones \mathbf{p}_i , se obtienen los planos wavelet \mathbf{w}_i ($i=1, \dots, n$). En la siguiente expresión vemos la fórmula de reconstrucción de la imagen original \mathbf{p} (donde se ha considerado $\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}$).

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i + \mathbf{p}_n \quad (6)$$

En esta representación, las imágenes \mathbf{p}_i ($i=1, \dots, n$) son versiones de la imagen original \mathbf{p} a escalas crecientes (resoluciones decrecientes), \mathbf{w}_i ($i=1, \dots, n$) son los planos wavelet y \mathbf{p}_n es una imagen residual (representación de \mathbf{p} a la escala mayor de la secuencia). Cabe notar que, como consecuencia del algoritmo «à trous» utilizado, tanto \mathbf{p}_i como \mathbf{w}_i son imágenes con el mismo número de píxeles que \mathbf{p} . Como propiedad importante a comentar de la expresión (6) figura el hecho que la suma de todos los píxeles de cada uno de los \mathbf{w}_i ($i=1, \dots, n$) es nula. Por tanto, resulta que la energía global de \mathbf{p} queda exclusivamente recogida en \mathbf{p}_n . Al ser la nuestra una descomposición de esquema diádico, nos encontramos que la relación entre las resoluciones de \mathbf{p}_i y \mathbf{p}_{i-1} ($i=1, \dots, n$) es 2.

Así, si p_0 tiene una resolución de 10m, p_1 tendrá 20m, p_2 40m, etc.

MÉTODO DE FUSIÓN POR WAVELETS

Como hemos visto en el apartado anterior, la metodología basada en wavelets se fundamenta en el hecho que en la transformada wavelet las aproximaciones p_i ($i=1, \dots, n$) son versiones de la imagen original a escalas consecutivas.

En el caso particular que nos ocupa, es importante notar que los primeros planos wavelet de la imagen PAN-AR contienen la información de detalle y resolución espacial no presente en la imagen ME-BR. La idea anterior es la que subyace en el seno de todos los métodos de fusión por wavelets existentes. Dentro de este marco, se pueden establecer dos tipos de enfoques a la hora de incorporar la información de detalle suplementaria de la imagen PAN-AR: métodos substitutivos y métodos aditivos. Como ya se mostró en (Núñez *et alii*, 1999a,b), los métodos de fusión aditivos resultan ser más convenientes que los substitutivos, ya que la toda información original, tanto espacial como multispectral, de la imagen ME-BR se traslada al resultado de la fusión.

Dentro de la fusión aditiva, podemos adoptar dos filosofías: la de añadir los planos wavelet de la imagen PAN-AR a cada componente **R**, **G** y **B** de la imagen ME-BR por separado, o hacerlo sobre la componente de la intensidad. A continuación describimos el procedimiento a seguir para cada una de las modalidades:

Adición por wavelets sobre las componentes **R**, **G**

B

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1) de nuevo, remuestreamos la imagen ME-BR para que sea superponible a la PAN-AR. Ésto se consigue siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de los métodos de fusión estándar.

2) especificar el histograma de PAN-AR tomando referencia la componente de intensidad de ME-BR.

3) descomponer la imagen PAN-AR en n (normalmente $n=2$ ó 3) planos wavelet:

$$PAN = \sum_{i=1}^n w_{p_i} + PAN_n \quad (7)$$

4) añadir los planos wavelet de la imagen PAN-AR a las componentes **R**, **G** y **B** de la imagen ME-BR.

$$\begin{aligned} R_{fusiónada} &= \sum_{i=1}^m w_{p_i} + R \\ G_{fusiónada} &= \sum_{i=1}^m w_{p_i} + G \\ B_{fusiónada} &= \sum_{i=1}^m w_{p_i} + B \end{aligned} \quad (8)$$

Llamaremos a este método **AWRGB**.

Adición por wavelets sobre las componentes de intensidad

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Los pasos 1) y 2) son idénticos a los del anterior apartado. Por tanto tenemos:

$$PAN = \sum_{i=1}^n w_{p_i} + PAN_n \quad (9)$$

3) transformar las componentes **R**, **G** y **B** de la imagen ME-BR en el plano IHS. Sean **L**, **H** y **S** las componentes en esta representación.

4) añadir los planos wavelet de la imagen PAN-AR a la componente **L** de la imagen ME-BR.

$$L_{fusiónada} = \sum_{i=1}^m w_{p_i} + L \quad (10)$$

5) transformar las nuevas componentes $L_{fusiónada}$, **H** y **S** al espacio RGB.

El procedimiento anterior puede adoptarse para cualquier definición de la componente de intensidad. En particular, para las tres definiciones expuestas en (1), (2) y (3), hablaremos de **AWI**, **AWL'** y **AWL**. La mayor diferencia entre las expresiones (8) y (10) reside en que cuando la

información pancromática de alta resolución es añadida en la misma cantidad en las tres componentes **R**, **G** y **B**, se está sesgando el color de cada píxel hacia el gris. Sin embargo, cuando se añade directamente sobre la componente de intensidad el color se preserva mejor, dado que gran parte del contenido multispectral que fijado en las componentes **H** y **S**. Esto hace que, desde el punto de vista teórico, los métodos aditivos sobre las componentes de intensidad sean preferibles.

En general, es difícil afirmar cuál de los tres métodos (**AWI**, **AWL'** y **AWL**) ofrece una fusión mejor. Para sensores situados en las bandas óptica y infrarroja, las diferencias entre los tres métodos son pequeñas, aunque significativas.

En el caso de un sensor ideal de «color real», las componentes **R**, **G**, **B** y la imagen pancromática presentarían una notable correlación mutua. Además, las intensidades promedio (tanto global como local) de cada una de las componentes **R**, **G** y **B** estarían radiométricamente equilibradas. Con ello, el método **AWL**, que distribuye proporcionalmente los valores de w_{p_i} ($i=1, \dots, n$), se comportaría mejor que **AWI** y **AWL'**.

En cambio, pueden existir casos en que la intensidad promedio de una componente sea menor a la del resto (p.e. un canal infrarrojo diurno). En esta circuns-

tancia, el método **AWI** modificaría en menor grado esa componente dispar, siendo el más indicado para realizar una fusión óptima.

RESULTADOS

Como imagen PAN-AR hemos considerado la banda pancromática [510-730]nm del satélite SPOT3, que incluye gran parte del visible y presenta un píxel de 10m.

Como imagen ME-BR se han considerado las tres bandas (near-IR [810-890]nm, red [610-690]nm, green [510-590]nm) de la cámara de ángulo estrecho (NAC) del satélite Thai Microsatellite (TMSAT), que presentan un píxel de 100m. Este tipo de satélites se han erigido como una solución ideal de bajo coste para determinadas aplicaciones como la cartografía a escala continental, el detección y seguimiento de desastres naturales, estudios generales de planificación de usos del suelo, etc. Gracias a la colaboración existente entre nuestro grupo de procesado de imágenes en el Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universidad de Barcelona (UB) i la Mahanakorn University of Technology (MUT) de Bangkok, pudimos conseguir imágenes TMSAT de una escena del Delta de l'Ebre (Tarragona) (Figura. 2), que solapaba con escena SPOT (Figura. 1).

Es evidente que ambas imágenes fueron captadas en diferentes épocas, como así lo delatan los usos del suelo más estacionales (lagos internos, campos de regadío, etc.).

Dado que la relación de resoluciones espaciales de los datos adoptados es elevada (1:10), hemos considerado oportuno remuestrear la imagen SPOT a 30m, con lo cual nos quedamos a 1:3.3 que es similar a la típica fusión SPOT+LANDSAT-TM. A continuación, hemos realizado la fusión de las anteriores imágenes mediante los métodos **IHS** (Figura 3), **L'HS**, **LHS**, **AWRGB**, **AWI** (Figura 4), **AWL'** y **AWL**. Por brevedad, hemos incluido sólo aquellas fusiones que son óptimas dentro de su categoría.

Desde el punto de vista cualitativo, se observa que tanto la fusión **IHS** como la **AWI** aportan un incremento en resolución espacial respecto la imagen TMSAT. Sin embargo, es evidente la degradación espectral de la fusión **IHS**. Incluso existen cambios drásticos en usos especialmente estacionales (cultivos de regadío, lagos interiores, etc.), que no son aceptables para el posterior uso de la imagen fusionada. En cambio el método **AWI** no adolece de este comportamiento de contaminación estacional y conserva la radiometría de la imagen TMSAT.

Para evaluar cuantitativamente las fusiones obtenidas, hemos utilizado como descriptor estadístico la correlación **C** entre la imagen TMSAT y la fusionada:

$$C(A/B) = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}} \quad (11)$$

Comparando (Tabla 1) las correlaciones de las fusiones por wavelets con las standard (**IHS**↔**AWI**, **L'HS**↔**AWL'**, **LHS**↔**AWL**) se comprueba que los métodos por wavelets aportan una correlación mayor, de acuerdo con el análisis cualitativo realizado en líneas anteriores.

Fusiones	Correlación		
	R	G	B
IHS	0,920	0,731	0,791
L'HS	0,829	0,674	0,742
LHS	0,918	0,666	0,748
AWRGBV	0,732	0,872	0,903
AWI	0,968	0,872	0,921
AWL'	0,910	0,740	0,822
AWL	0,946	0,788	0,864

Tabla 1. Correlaciones entre las fusiones realizadas y la imagen TMSAT original.

Tal como se señaló en el anterior apartado, la distribución espectral de las bandas de la imagen ME-BR es importante para el funcionamiento óptimo de los diferentes métodos aditivos de fusión por wavelets. En el caso de las imágenes TMSAT, hemos asimilado el canal infrarrojo para la componente **R**, el rojo para la **G** y el verde para la **B**. A la vista está que la componente **R**, aparte de ubicarse fuera de la ventana pancromática, presentará unos valores de intensidad promedio muy por debajo de los de las otras componentes. Parece pues, tal y como se comprueba en la Tabla 1, que el método **AWI** resulta ventajoso respecto al resto de método de fusión por wavelets.

CONCLUSIONES

De nuevo, esta vez con datos TMSAT, los métodos de fusión por wavelets aditivos han mostrado un comportamiento superior a los standard. Han logrado incorporar a la imagen TMSAT resolución espacial sin modificar apenas su información multiespectral. Tales algoritmos de fusión se revelan, pues, como una herramienta complementaria interesante para todas aquellas aplicaciones que requieran resolución espacial apreciable.

BIBLIOGRAFÍA

P. S. CHAVEZ, S. C. SIDES y J. A. ANDERSON, *PE&RS*, 57, 3, 295-303, 1991.

J. NÚÑEZ, X. OTAZU, O. FORS, A. PRADES, V. PALÀ y R. ARBIOL, *JOSAA*, 6, 3, 467-474,1999a.
 J. NÚÑEZ, X. OTAZU, O. FORS, A. PRADES, V. PALÀ y R. ARBIOL, *IEEE TG&RS*, 37, 3, 1204-1211,1999b.
 T. RANCHIN, L. WALD and M. MANGOLINI, *PE&RS*, 63, 6, 691-699,1997.
 A. R. SMITH, *Computer Graphics*, 13, 3,12-19,1978.
 J. L. STARCK y F. MURTAGH, *Astronomy and Astrophysics*, 288, 342-350,1994.
 D. A. YOCKY, *PE&RS*, 62, 9,1067-1074,1996.

J. ZHOU, D. L. CIVCO y J. A. SILANDER, *IJRS*,19,4,743-757, 1998.

AGRADECIMIENTOS

ICC, por la cesión de la imagen SPOT utilizada en el presente trabajo.

O. Fors disfruta de una beca pre-doctoral del MECD (ref.: AP97-38107939).

DGICYT, MCyT (ref: PB97-0903).



Figura 1. Imagen SPOT PAN.



Figura 2. Imagen TMSAT.



Figura 3. Fusión SPOT + TMSAT mediante el método standard IHS.



Figura 4. Fusión SPOT + TMSAT mediante el método wavelets aditivo sobre la componente I (AWI).

(Ver figuras en color en la página 682)