

# Métodos básicos de fusión de imágenes

<b>Apellidos, nombre</b>	Ruiz Fernández, Luis Ángel (laruiz@cgf.upv.es)
<b>Departamento</b>	Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría
<b>Centro</b>	ETSI. Geodésica, Cartográfica y Topográfica



## 1 Introducción

El diseño de sensores óptico-electrónicos para su uso en satélites de observación terrestre está experimentando un gran desarrollo. Una de las características que adquiere prioridad en su diseño es la resolución espacial, cuya mejora permite ampliar el ámbito de aplicaciones de las imágenes y aumentar la precisión geométrica de las mediciones y análisis derivados. Sin embargo, a igualdad de los demás factores, el incremento de la resolución espacial implica una disminución de la relación señal/ruido del sensor, que a su vez se traduce en una menor calidad de la imagen. Para compensar este efecto, los sensores de mayor resolución espacial se diseñan con una resolución espectral menor, esto es, son sensibles a un intervalo espectral más amplio de energía electromagnética. De esta manera, la reducción de la porción de superficie terrestre que refleja energía hacia cada detector se ve compensada por una mayor diversidad espectral de la energía que llega al sensor. Así por ejemplo, mientras los sensores pancromáticos de SPOT e IRS poseen resoluciones espaciales de 10 m y 5,8 m, respectivamente, las de sus sensores multiespectrales asociados, HRV-Xs y LISS-III, son de 20 m y 23 m, respectivamente.

En los últimos años se han venido desarrollando técnicas que permiten combinar, en una misma imagen, la elevada resolución espacial de las imágenes pancromáticas con la mayor cantidad de información espectral contenida en las imágenes multiespectrales. Estas técnicas se incluyen dentro de lo que se conoce como fusión de imágenes. Esta denominación engloba a todos aquellos métodos cuyo objetivo es combinar o integrar varios tipos de imágenes de distintas características, como por ejemplo imágenes de radar con ópticas, de satélite con aéreas, térmicas con ópticas, etc. Sin embargo, y aunque las metodologías sean básicamente las mismas, en este tema dedicaremos la atención a la combinación de imágenes pancromáticas y multiespectrales (del visible e infrarrojo cercano), dado su interés actual debido tanto al incremento reciente de satélites con estos dos tipos de sensores, como a sus aplicaciones cartográficas prácticas.

En el tema se describirán únicamente cinco metodologías básicas de fusión:

1. Método multiplicativo
2. Método de Brovey
3. Modulación de las altas frecuencias
4. Transformación al espacio de color HSI
5. Transformación de componentes principales

## 2 Objetivos

Una vez que el estudiante lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Entender el concepto de fusión de imágenes, en particular entre imágenes de satélite obtenidas con sensores pancromáticos y multiespectrales.
- Conocer cinco de los métodos básicos de fusión de imágenes y saber interpretar los resultados obtenidos mediante software estándar de tratamiento digital de imágenes.



- Conocer los aspectos básicos que influyen en la calidad del resultado de un proceso de fusión de imágenes.

### 3 Métodos de fusión de imágenes

Los métodos empleados en la fusión de imágenes son diversos. Desde los más directos basados en combinaciones algebraicas entre bandas, como son los métodos multiplicativo y de Brovey, hasta los más recientes, como son los que incorporan la aplicación de la transformada de *wavelets* en su procedimiento. Además del fundamento teórico de algunos de los métodos más utilizados, veremos ejemplos que nos permitan comparar los resultados, si bien éstos suelen ser dependientes de las características de los datos iniciales (tipo de sensores, tipo de paisaje, correlación espectral entre bandas, etc.). Para una revisión más exhaustiva de los métodos de fusión de imágenes, puede consultarse Pohl y Van Genderen (1998).

En todos los casos, como datos de partida supondremos una imagen multiespectral con  $n$  bandas espectrales y una imagen de alta resolución pancromática aunque, de forma genérica, podría tratarse de otro tipo de imagen (radar,...).

#### 3.1 Método multiplicativo

Se trata del método más sencillo y directo de los propuestos, ya que cada nueva banda espectral de la imagen fusionada ( $B_i'$ ) se obtiene multiplicando cada respectiva banda espectral original ( $B_i$ ) por la imagen de alta resolución espacial ( $Pan$ )

$$B_i' = B_i \cdot (Pan) \quad (1)$$

Mediante esta operación, las características espectrales de las bandas multiespectrales iniciales se modifican aproximándose a las de la imagen de alta resolución, dando como resultado una pérdida de la información espectral original, tanto mayor cuanto más difieran las imágenes multiespectrales originales de la pancromática, esto es, menos correlación exista entre ellas. Por ello, los resultados obtenidos mediante este método suelen ser limitados. En la práctica, debido a que la operación de multiplicación modifica el intervalo potencial de niveles de gris de una imagen, se deben convertir las imágenes iniciales a una precisión de punto flotante, para poder así representar el nuevo intervalo de valores para cada píxel.

En la figura 1 se esquematiza el procedimiento que se sigue en la aplicación de este método. En primer lugar, es necesario registrar geoméricamente la imagen multiespectral (baja resolución) con respecto a la imagen pancromática (alta resolución). A continuación, se realiza un remuestreo de la primera para que tenga el mismo número de píxeles, tanto en las filas como en las columnas, que la imagen de alta resolución. Así, por ejemplo, para realizar la fusión entre una imagen Landsat ETM (30 m) y su correspondiente pancromática (15 m), deberá remuestrearse la primera de forma que de cada píxel de 30 m se obtengan cuatro

píxeles de 15 m, los cuatro con el mismo nivel de gris (ello no supone el aumento de su resolución espacial). Este tratamiento posibilita que las operaciones posteriores entre ambas imágenes puedan realizarse píxel a píxel. Una vez hecho esto, se multiplica cada banda por la pancromática, teniendo en cuenta que el valor resultante de cada píxel sea almacenado con una precisión de punto flotante para que pueda expresar el resultado del producto.

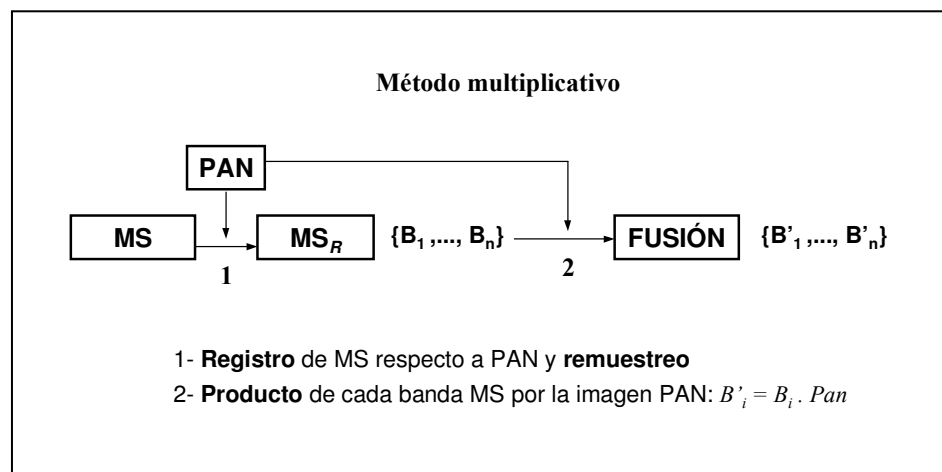


Figura 1.- Procedimiento del método de fusión **multiplicativo**.

### 3.2 Método de Brovey

Se basa en operaciones algebraicas entre bandas y parte del supuesto de que la combinación de las bandas espectrales de baja resolución cubre aproximadamente la misma franja espectral que la imagen pancromática de alta resolución. Cada nueva banda se calcula mediante el producto de la imagen pancromática por cada banda espectral original normalizada por la suma de las bandas espectrales originales (cuya cobertura espectral total se supone similar a la de la imagen pancromática):

$$B'_i = \frac{B_i}{B_1 + B_2 + \dots + B_n} \cdot (Pan) \quad (2)$$

$(i=1, 2, \dots, n)$  ;  $n$  = número de bandas espectrales.

La figura 2 esquematiza el procedimiento, el cual se inicia, al igual que en el método anterior, con el registro geométrico y remuestreo de la imagen de baja resolución. Posteriormente, se multiplica cada banda normalizada por la imagen de alta resolución. Los resultados obtenidos son variables dependiendo del número de bandas consideradas y de sus respectivos intervalos espectrales.

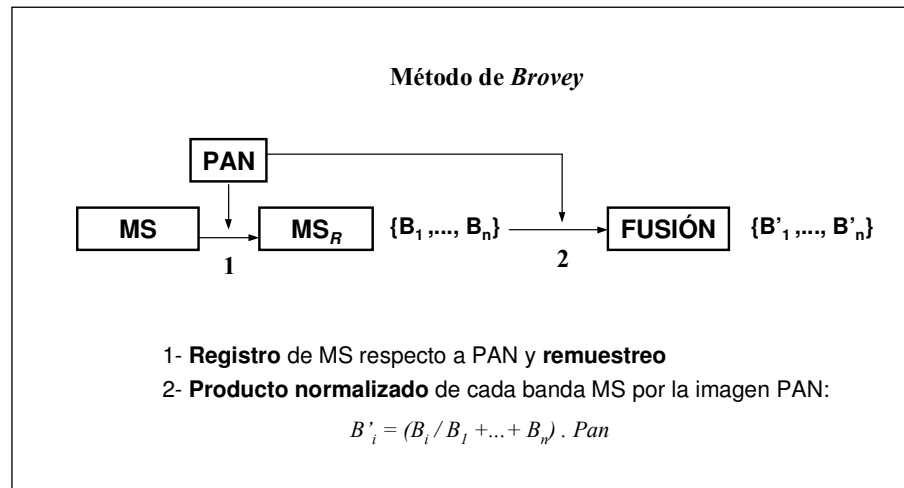


Figura 2.- Procedimiento del método de fusión de **Brovey**.

Al igual que en el método anterior, en su aplicación práctica hay que tener en cuenta los cambios en la precisión de los datos por efecto de la multiplicación. La figura 3 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos mediante los métodos multiplicativo y de Brovey empleando como datos originales detalles de dos imágenes IRS, una pancromática (5,8 m/píxel) y otra multispectral (23 m/píxel).

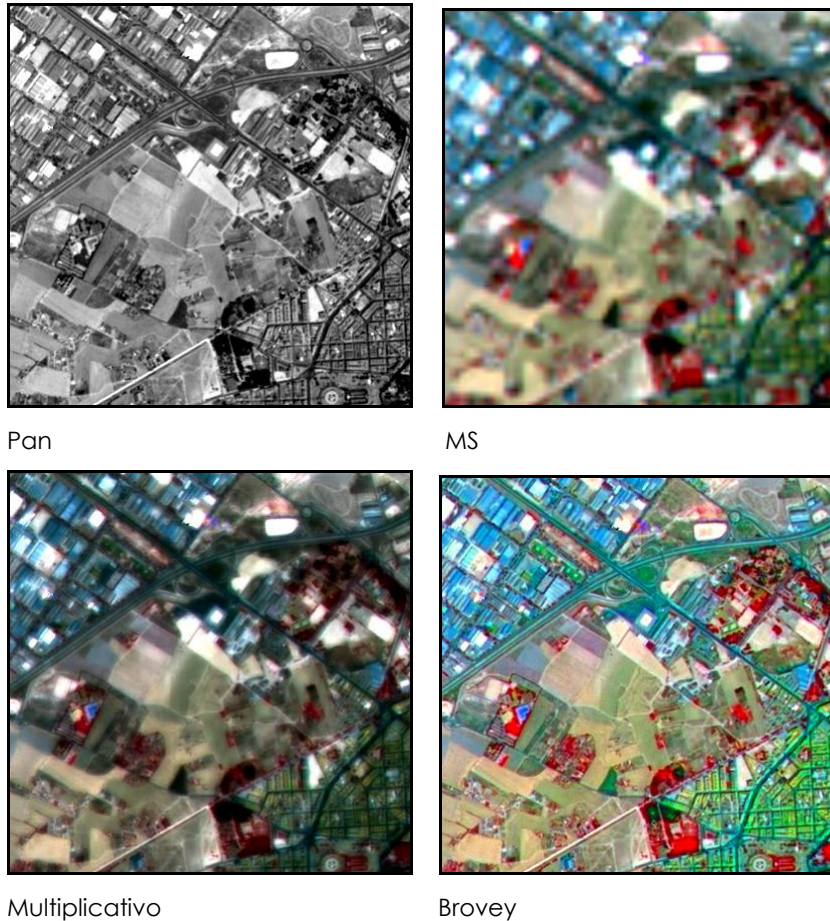


Figura 3.- Imágenes pancromática (5,8 m) y multiespectral (23 m) del satélite IRS-1D (fila superior), y el resultado de su fusión por los métodos multiplicativo y de Brovey (fila inferior).

### 3.3 Modulación de las altas frecuencias

Se trata de una variación de los denominados métodos de fusión en el dominio espacial (Schowengerdt, 1997), cuya idea es la de transferir las altas frecuencias de la imagen de alta resolución a la imagen de baja resolución. Como ya es sabido, las altas frecuencias contienen la información relativa a los detalles de una imagen y pueden extraerse mediante operaciones de filtrado o convolución. Básicamente, estos métodos consisten en la suma de las altas frecuencias de la imagen pancromática a cada banda de la imagen multiespectral

$$R_i = (MS)_i + PA(Pan) \quad (3)$$

donde  $R_i$  representa una banda genérica de la fusión y  $PA(Pan)$  es el resultado de aplicar un filtro paso-alto sobre la imagen pancromática. Esta ecuación es similar a



la de aplicación de un filtro de realce de las altas frecuencias (*high-boost*), con la particularidad de que la imagen que aporta el componente paso-alto es distinta, en este caso la pancromática de alta resolución. Así, la eficiencia de este filtro se basa en la existencia de una correlación radiométrica elevada entre los componentes de altas frecuencias de ambas imágenes.

Debido a la aparición de singularidades en zonas de baja correlación radiométrica, a la expresión anterior (3) se le añadió una corrección heurística mediante un coeficiente  $K_i$ :

$$R_i = (MS)_i + K_i \cdot PA(Pan) \quad (4)$$

Un caso particular de los métodos espaciales es el llamado **modulación de las altas frecuencias** (*HFM, High Frequency Modulation*). Consiste en la multiplicación de cada banda de baja resolución ( $MS_i$ ) por la imagen de alta resolución ( $Pan$ ), normalizándose por el componente paso-bajo de ésta última ( $PB(Pan)$ ):

$$R_i = \frac{(MS)_i \cdot (Pan)}{PB(Pan)} \quad (5)$$

Este algoritmo supone que las nuevas bandas espectrales son proporcionales, para cada píxel, a la imagen de alta resolución, y que dicha proporcionalidad viene dada por un factor de ganancia  $K_i$ :

$$K_i = \frac{(MS)_i}{PB(Pan)} \quad (6)$$

sustituyendo en (5)

$$R_i = K_i \cdot (Pan) \quad (7)$$

Por otra parte, la imagen pancromática puede expresarse en función de sus componentes de bajas y altas frecuencias

$$(Pan) = PB(Pan) + PA(Pan) \quad (8)$$

que sustituidos en la expresión (5) y operando

$$\begin{aligned} R_i &= \frac{(MS)_i \cdot [PB(Pan) + PA(Pan)]}{PB(Pan)} = \\ &= (MS)_i \cdot \left[ 1 + \frac{PA(Pan)}{PB(Pan)} \right] = \\ &= (MS)_i + K_i \cdot PA(Pan) \end{aligned} \quad (9)$$

la ecuación obtenida (9) es equivalente a (4), por lo que el método de modulación de las altas frecuencias es un caso particular de los métodos espaciales descritos, con la característica de tener un coeficiente  $K$ , el cual depende de la banda multispectral y del componente de bajas frecuencias de la imagen pancromática. En la aplicación práctica del método, el problema radica en la selección adecuada de los filtros. Según *Schowengerdt (1997)*, se obtienen mejores resultados si el filtro paso-bajo se diseña de forma que se ajuste a la *función de dispersión puntual (PSF, Point Spread Function)* relativa entre ambas imágenes. La PSF es una función de ponderación sobre la señal electrónica que se



produce a la salida de los detectores y que depende de factores ópticos, del movimiento de la imagen en su adquisición, del propio detector y de los componentes electrónicos que entran en juego durante el proceso. La figura 4 muestra un ejemplo de la aplicación de este método de fusión.

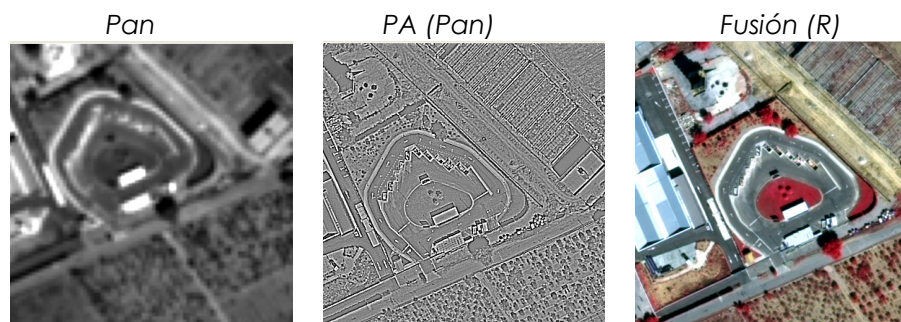


Figura 4.- Detalle de una imagen pancromática (izquierda), resultado de aplicarle un filtro paso-alto (centro), y resultado de la fusión (derecha).

### 3.4 Transformación al espacio de color HSI

Para visualizar una imagen digital en color se requiere un espacio de representación de los colores que sea compatible con los dispositivos de visualización empleados habitualmente. Esto se consigue mediante el espacio de coordenadas RGB, en el que sus coordenadas representan la proporción de cada uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) necesaria para representar el color de cada punto de la imagen (figura 5a). En las imágenes multispectrales es común visualizar las bandas espectrales combinadas de tres en tres, asignando uno de los tres colores primarios a cada banda. Estas combinaciones se denominan genéricamente *composiciones en falso color*. Sin embargo, desde un punto de vista perceptual, es decir, de cómo percibimos los colores los humanos, sería más conveniente la representación de los mismos en función de coordenadas que representen propiedades como la longitud de onda del color, su pureza y su luminosidad. Espacios como el HSI (*Hue, Saturation, Intensity*) ofrecen esa posibilidad a través de sus tres coordenadas: tono, saturación e intensidad (figura 5b).

Existen algoritmos que permiten transformar una imagen en color (3 bandas espectrales) del espacio RGB al HSI y realizar la transformación inversa. El componente de la intensidad representa la luminosidad o el brillo de la imagen y tiene su equivalencia geométrica en la diagonal principal del cubo RGB. En otras palabras, la intensidad puede entenderse como la imagen monocromática (representada en niveles de gris) asociada al intervalo espectral integrado por las tres bandas espectrales.



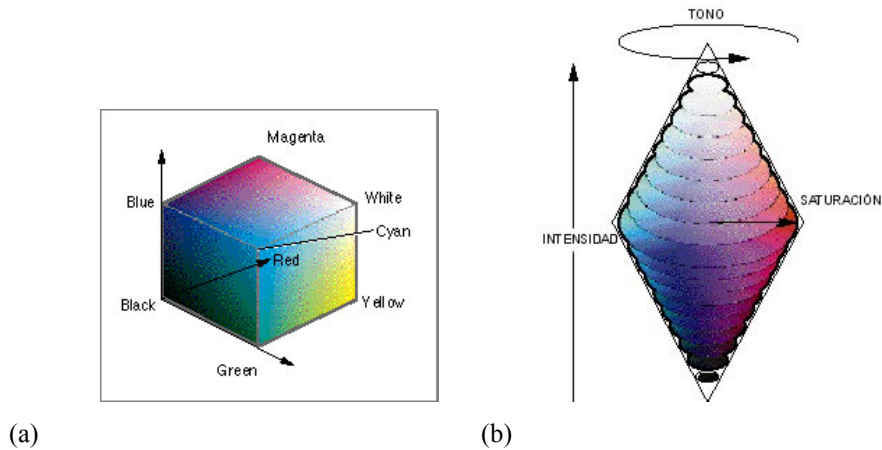


Figura 5.- Representación gráfica de los espacios de color a) RGB y b) HSI.

Este método de fusión se basa en la transformación de tres bandas de la imagen multispectral al espacio HSI y la posterior sustitución del componente intensidad por la imagen pancromática de alta resolución. Una vez hecho esto, se transforma de nuevo al espacio de color RGB, de forma que al volver a representar la imagen en este espacio, se mantiene la información espectral original superpuesta sobre el detalle correspondiente a la resolución espacial de la imagen pancromática. Por consiguiente, el método está limitado a una combinación de sólo tres bandas de la imagen multispectral. Es importante que el componente intensidad y la imagen pancromática presenten una elevada correlación radiométrica, por lo que es recomendable ajustar previamente la imagen pancromática respecto al componente de intensidad, compensándose así una insuficiente correlación entre ambas.

El procedimiento completo se esquematiza en la figura 6 y se resume en las siguientes fases:

1. **Registro geométrico** de la imagen multispectral respecto a la pancromática de alta resolución. En el mismo proceso, se realiza el **remuestreo** de la primera imagen para conseguir el mismo tamaño de pixel que la segunda.
2. **Transformación** de la imagen multispectral (3 bandas) al espacio de color **HSI**.
3. **Ajuste radiométrico** de la imagen pancromática con respecto al componente de intensidad. Esto puede realizarse mediante técnicas de especificación del histograma, por ejemplo, o ajustando los histogramas en función de los valores de sus medias y desviaciones típicas.
4. **Sustitución** del componente intensidad por la imagen pancromática que ha sido previamente ajustada.
5. **Transformación inversa** desde el espacio HSI al espacio RGB.

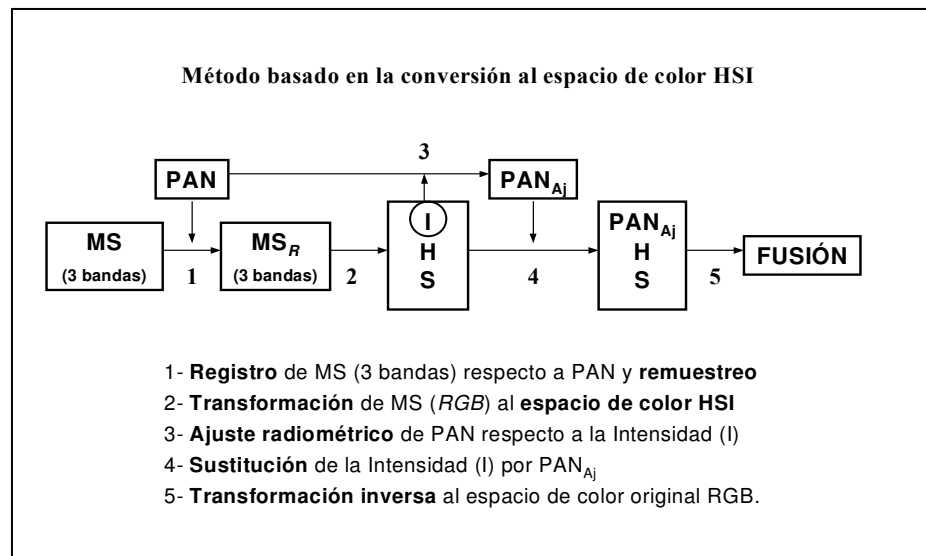


Figura 6.- Procedimiento del método de fusión basado en la **transformación al espacio de color HSI**.

### 3.5 Transformación de componentes principales

Se trata de un método análogo al anterior que consiste en la aplicación de la transformación de componentes principales sobre la imagen multiespectral y en la posterior sustitución del primer componente por la imagen de alta resolución.

La transformación de componentes principales genera nuevas bandas, obtenidas como combinación lineal de las iniciales y que representan la información contenida en la imagen original organizada en orden decreciente, de forma que el primer componente contiene más información que el segundo, éste más que el tercero y así sucesivamente. En la práctica, el primer componente suele estar asociado a la luminosidad o intensidad global de la escena. Bajo este supuesto, al ser sustituido por la imagen pancromática no habrá modificaciones espectrales importantes. Al igual que en el método basado en la transformación al espacio HSI, su eficiencia depende de la correlación radiométrica existente entre el primer componente principal y la imagen de alta resolución, requiriéndose un ajuste radiométrico previo entre ambas para compensar una posible falta de correlación.

El procedimiento se esquematiza en la figura 7, y se resume en las siguientes fases:

1. **Registro geométrico** de la imagen multiespectral respecto a la pancromática de alta resolución. En el mismo proceso, se realiza el **remuestreo** de la primera imagen para conseguir el mismo tamaño de píxel que la segunda.
2. Aplicación de la transformación de **análisis de componentes principales** sobre la imagen multiespectral ( $n$  bandas).
3. **Ajuste radiométrico** de la imagen pancromática con respecto al primer componente principal. Al igual que en el caso anterior, puede realizarse mediante la especificación del histograma o ajustando ambos histogramas en función de los valores de sus medias y desviaciones típicas.

4. **Sustitución** del primer componente principal por la imagen pancromática que ha sido previamente ajustada.
5. **Transformación inversa** de análisis de componentes principales.

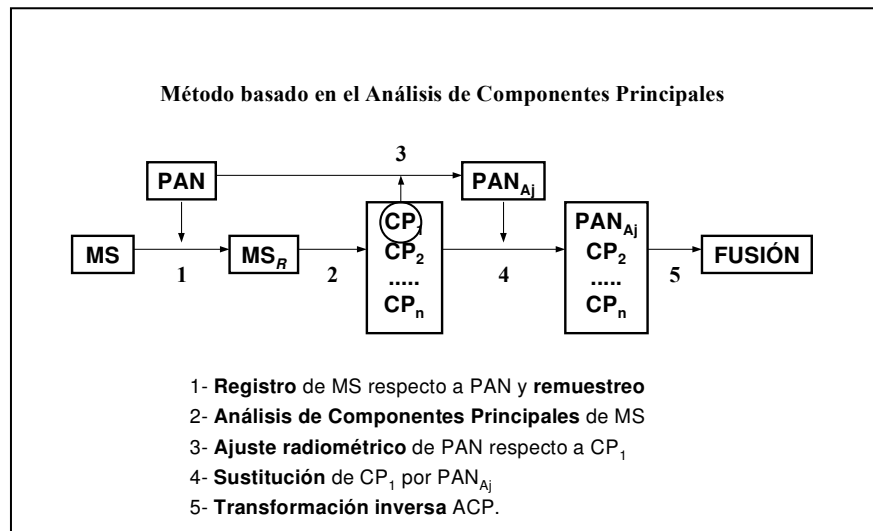


Figura 7.- Procedimiento del método de fusión basado en la **transformación de componentes principales**.

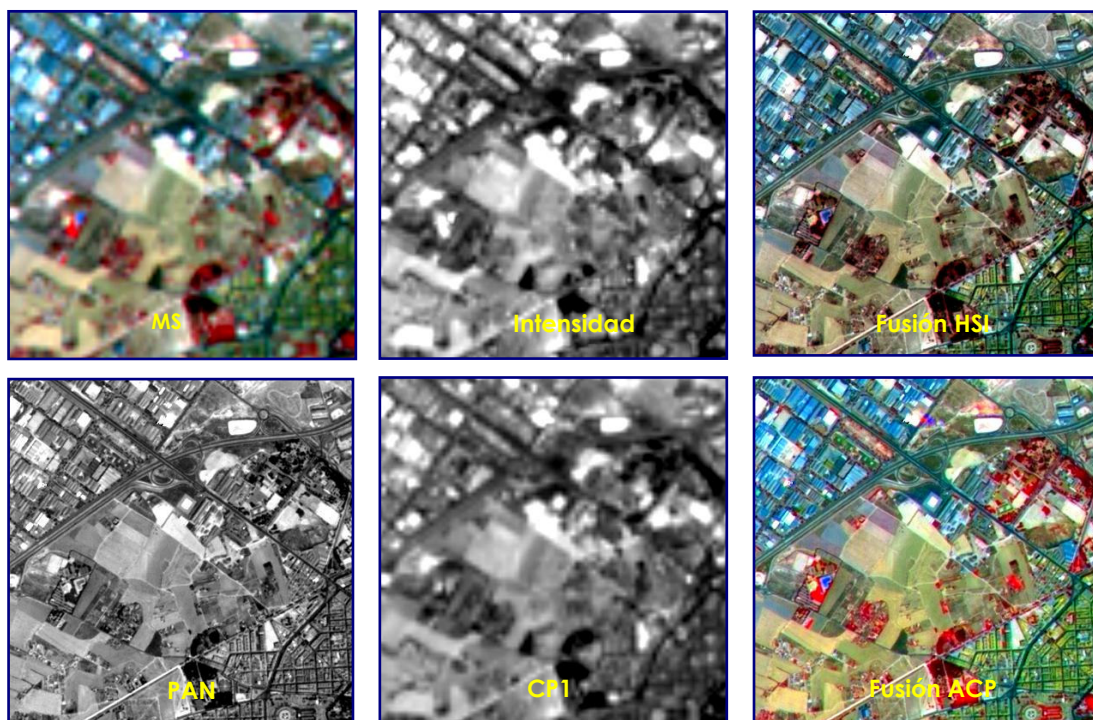


Figura 8.- Resultado comparativo de los métodos de fusión basados en las transformaciones HSI y análisis de componentes principales. En el centro, resultados parciales de intensidad y 1er componente principal de la imagen multispectral.



## 4 Conclusiones

En general, cuando no hay correlación suficiente entre la banda pancromática y las bandas multiespectrales, los métodos basados en sustitución espectral (HSI, ACP) ofrecen resultados más pobres que los métodos basados en la adición de las altas frecuencias o detalles (modulación de las altas frecuencias, *wavelets* aditivo). Estos últimos métodos son menos sensibles, por tanto, a la falta de correlación espectral entre bandas.

En la aplicación práctica, la calidad del resultado de la fusión de imágenes procedentes de diferentes sensores puede mejorarse teniendo en cuenta los siguientes aspectos (Schowengerdt, 1997):

- Para reducir los efectos debidos a las características propias de la escena (tipo de paisaje,...) es conveniente que las fechas de adquisición de las imágenes sean tan próximas como sea posible.
- Los efectos debidos a las características espectrales del sensor disminuyen cuando el intervalo espectral de la imagen de alta resolución es similar al de la banda o bandas espectrales de baja resolución. Esta propiedad afecta en mayor grado a los métodos basados en sustitución.
- Para evitar en lo posible las singularidades radiométricas, el histograma de la imagen de alta resolución deberá ajustarse al del componente o banda que sustituye. Esto puede hacerse mediante métodos estándar de normalización radiométrica.

Estos aspectos pierden relevancia cuando las imágenes que se van a combinar provienen de regiones del espectro electromagnético con diferentes características ópticas. En tales casos, no hay razón para suponer una correlación radiométrica entre ambas imágenes. Un ejemplo los constituyen las fusiones entre imágenes multiespectrales e imágenes SAR, cuyo objeto principal es diversificar lo más posible el tipo de información contenida en una sola imagen, de forma que evidencie elementos adicionales que mejoren su interpretación.

## 5 Bibliografía

- Pohl, C. and Van Genderen, J.L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. Int. J. Remote Sensing, Vol. 19, No. 5, pp 823-854, 1998.
- Schowengerdt, R.A., Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing. Academic Press, 1997.