

La fusión de datos en teledetección

F. J. Tapiador¹ y J. L. Casanova²

Correo electrónico: f.tapiador@bham.ac.uk

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Birmingham, Reino Unido

² Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV)

RESUMEN

En los últimos 10 años ha aparecido un conjunto de metodologías para realizar operaciones de fusión de datos, entendida ésta como un proceso en el que, partiendo de imágenes de diferente resolución espacial, espectral y radiométrica, se obtienen productos complementarios. En este trabajo se presenta este nuevo campo de investigación en Teledetección, se exponen las técnicas más importantes en la actualidad, sus aplicaciones, y se evalúan las posibilidades futuras que ofrece.

PALABRAS CLAVE: Fusión de datos

ABSTRACT

The concept of data fusion is a set of processes to achieve complementary outputs from different radiometric, spectral and spatial resolution images. In the last 10 years a set of methodologies have appear to get it. In this work this new field of research in RS is presented, showing the most interesting techniques nowadays, the applications and evaluating the future possibilities of it.

KEY WORDS: Data fusion

INTRODUCCIÓN. TERMINOLOGÍA

La fusión de datos es un conjunto de técnicas diversas, cuyo común denominador es la mejora de ciertas características de los datos de teledetección (resolución, cobertura, etc.) a partir de conjuntos de datos que, por sí solos, carecen de ellas. Un ejemplo es la mejora de la resolución espacial de las imágenes pancromáticas SPOT (10 m. de resolución espacial, 1 canal) con las multiespectrales SPOT (3 canales, 20 m. de resolución espacial), consiguiendo imágenes multiespectrales, de tres canales, a una resolución de 10 metros. Otros de los métodos que se engloban bajo el epígrafe de *fusión de datos* son la integración de información vectorial y ráster, de información procedente de diferentes sensores, de datos GPS con cartografía catastral, o bases de datos tradicionales. En la actualidad existe un cierto debate sobre la terminología a emplear, encontrándose en la bibliografía algunos intentos de normalización (Wald 1999, Pohl y Touron 2000, Diemer y Hill 2000).

APLICACIONES DE LA FUSIÓN DE DATOS

La fusión de datos se viene utilizando en Observación de la Tierra, pero también en Astronomía (para mejorar imágenes tomadas con diferentes sensores y con objeto de restaurar imágenes defectuosas), y en otros ámbitos del tratamiento digital de imágenes. En Teledetección, la línea de investigación con mayor número de trabajos en la actualidad se inscribe en el campo de la mejora de la resolución espacial de las imágenes de alta resolu-

ción espectral, como es el caso de las imágenes NOAA.

Las aplicaciones de estas técnicas se centran en aquellos trabajos que requieren mejorar de alguna manera la discriminación de cubiertas a la mejor resolución espacial posible. Es el caso de extraer información de tipo 'usos del suelo' a resolución 5 metros utilizando imágenes LANDSAT de 30 m. La resolución LANDSAT, para estudios como el planeamiento urbanístico, es insuficiente, mientras que las imágenes de 5 metros de, por ejemplo, el sensor IRS-1D sólo nos proporciona información fisiográfica, en su canal pancromático. En trabajos de ordenación del territorio en los que se ha aplicado esta técnica (Directrices de Ordenación Territorial del Área Funcional de Segovia, por ejemplo), se ha comprobado como es imprescindible contar con la mejor resolución disponible, debido a la necesidad de plasmar de manera precisa sobre el territorio una serie de políticas que tienen en cuenta la heterogeneidad del territorio.

MÉTODOS DE FUSIÓN DE DATOS

En los últimos años se han desarrollado no menos de una docena de métodos para realizar la mejora de la resolución espacial de algunos sensores. Algunas de las metodologías empleadas son las siguientes:

El método IHS

El método IHS (acrónimo de Intensidad, Brillo y Saturación) se basa en la transformación de la imagen desde el espacio de color RGB hasta otro en el que los ejes son, precisamente, la intensidad, el brillo y la saturación. El modelo de transforma-

ción varía de unos autores a otros. Para imágenes de satélite, es usual utilizar el descrito por Pohl y Van Genderen (1998), cuyas ecuaciones, notando como I, v₁ y v₂ a la intensidad, el brillo y la saturación, respectivamente; y R, G, B al espacio de color usual, son:

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$H = \frac{1}{\tan\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}$$

$$S = (v_1^2 + v_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

no estando H definida si v₁=0, esto es, si R+G=2B. Para este caso se adoptan soluciones estándar. La transformación inversa se realiza mediante el sistema:

$$\begin{aligned} v_1 &= S \cdot \cos(H) \\ v_2 &= S \cdot \sin(H) \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

El método es uno de lo más usados. Su limitación fundamental radica en la distorsión que provoca en las características espectrales de la imagen original, pero tiene como ventajas su sencillez conceptual, lo intuitiva que resulta la transformación y la rapidez con que pueden llevarse a cabo las operaciones.

El método PCS

Este método (*Principal Component Substitution*) es descrito por varios autores (Göpfert 1987, Albert et al. 1988, Albertz y Tauch 1991, Chavez et al. 1991, Ehlers 1991, Shettigara 1992, Kaufmann y Buchroithner 1994, Zhang 1997), siendo otro de los más utilizados. Puede atribuirse a Göpfert (Göpfert 1987). Su fundamento teórico es muy parecido al IHS. Consiste en dos procesos sucesivos: la sustitución de la intensidad en el espacio de color -que puede ser vista como la imagen de más alta resolución espacial- por la primera componente principal, por una combinación de ésta con al-

guna banda de la multiespectral, o por una combinación de la primera y segunda componentes principales. El segundo paso consiste en realizar la transformación inversa para recomponer la imagen, dando como resultado una imagen fusionada.

Formalmente, si tenemos un conjunto de imágenes {In}, con n([1,N]), sea Cov la matriz varianza-covarianza del conjunto. C es simétrica, luego puede diagonalizarse de la siguiente manera (teorema de Jordan):

$$M^t C M = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}$$

pudiendo ordenarse los autovalores li , y siendo M la matriz unitaria cuyas columnas son los autovectores:

V= (v₁, ..., v_n), siendo v_i= (v_{1,i}, ...v_{n,i}) los autovectores correspondientes a li.

Para cada autovector k, la k-ésima componente C_k se calcula:

$$C_k = \sum_{i=1}^n v_{i,j} I_p$$

Nótese que para la implantación efectiva del método basta calcular el primer autovalor, su autovector correspondiente, y la primera componente principal. La imagen resultante, la primera componente principal, es una imagen que retiene gran parte de la información que contienen las bandas de partida. La lógica del método es insertar esta información como la componente intensidad, ya que el brillo y la saturación no nos aportan información fisiográfica. Una de las limitaciones del método reside en que la primera componente principal no recoge toda la varianza, dependiendo la calidad final de la imagen -a efectos de conservación de la respuesta espectral- del grado de varianza retenida. A partir de valores del 95%, poco usuales por otra parte, se pueden encontrar correlaciones significativas que dan cuenta de la fiabilidad del método. Sin embargo, la utilización de dos componentes principales suele ofrecer resultados más ajustados, al retener usualmente más de un 97% de la varianza total entre las dos.

Contribución espectral relativa

Bajo esta denominación se encuadran varios métodos, como el algoritmo de Brovey o el P+XS (vs. Wald 1999) que realizan la fusión mediante operaciones algebraicas entre bandas. Se parte de la hipótesis de que las longitudes de onda que cubre la imagen de banda ancha, el pancromático, son cubiertas a su vez por una combinación de bandas de la imagen de baja resolución espacial, lo cual sólo es válido como aproximación en la mayoría

de los casos. Los resultados prácticos de este procedimiento son bastante limitados (Wald 1999).

El método SVR

El método de ‘cociente sintético variable’ fue propuesto por Pradines (1986), Price (1987) y Munechika et al. (1993). Se trata más de un método de unión de que fusión, mediante el que la imagen multispectral es calculada según la expresión (Zhang 1999)

$$XSP_i = Pan_H \frac{XS_{Li}}{Pan_{LSyn}}$$

en donde XSP_i es el nivel digital de la i -ésima banda de la imagen multispectral de alta resolución, Pan_H el de la pancromática, XS_{Li} el nivel digital de la i -ésima banda de la imagen multispectral de origen y Pan_{LSyn} el correspondiente a una imagen sintética pancromática de baja resolución simulada mediante la multispectral. Para crear esta imagen sintética hay diferentes aproximaciones. Para Munechika et al. (1993), basándose en Suits et al. (1988):

$$Pan_{LSyn} = \sum_{i=1}^4 \phi_i XS_{Li}$$

Los ϕ_i se calculan utilizando modelos empíricos que tienen en cuenta los efectos atmosféricos y las respuestas espectrales de unas clases determinadas de cubiertas. En la práctica, se calculan mediante regresión sobre los valores simulados con los modelos atmosféricos, y se realiza también un ajuste del histograma para adecuar las imágenes a las mismas condiciones de iluminación. El principal problema de este método es que el cálculo de los coeficientes se realiza tan sólo para un número determinado de clases, que incluyen diferentes respuestas espectrales. La necesidad de un modelo de corrección atmosférica, y la incapacidad para realizar el proceso para áreas extensas son otros dos problemas que llevaron a proponer mejoras.

El método SVR mejorado

Este método se debe a Zhang (1999). Partiendo del método SVR, Zhang propone que:

$$XSP_i = Pan_H \frac{XS_{Hi}}{Pan_{HSyn}}$$

donde XSP_i es lo mismo que en el SVR, mientras que ahora XS_{Hi} es el valor digital de la i -ésima banda de la imagen multispectral renormalizada hasta la misma resolución espacial de la pancromática, y Pan_{HSyn} es el nivel digital de la imagen de alta resolución pancromática simulada mediante: Aquí, los ϕ_i se calculan mediante análisis de regre-

sión sobre la ecuación siguiente: que nos relaciona la imagen primigenia pancromática con la original multispectral renormalizada al mismo tamaño de píxel que la anterior. Las mejoras sobre el método precedente son:

- Los parámetros ϕ_i se calculan directamente utilizando las imágenes de partida, sin recurrir a modelos atmosféricos, ahorrando así tiempo de computación. Además, la dependencia entre radiancias de las clases queda asegurada y no depende de la elección del usuario.
- Para calcular la imagen sintética pancromática se utilizan todas la bandas de la multispectral en vez de tan sólo la 1, 2, 3 y 4, evitando así la distorsión en los colores resultantes. Los ejemplos proporcionados por el autor, en particular el ajuste radiométrico, son convincentes, si bien el método no consiste en una fusión pura, sino en una mezcla de información entre diferentes sensores.

El método de las onditas. El concepto ARSIS

El llamado por sus autores ‘concepto ARSIS’ (Accroissement de la Résolution Spatiale par Injection de Structures; incremento de la resolución espacial por inyección de estructuras) es, como su propio nombre indica, un método que utiliza la información de mayor resolución espacial para ‘inyectarla’, según una estrategia que supone las hipótesis siguientes, para la fusión de imágenes multispectrales con pancromáticas (Mangolini 1994):

- Debe existir una similitud entre las 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.
- Las imágenes a fusionar pueden haber sido tomadas en épocas diferentes, a condición de que exista similitud entre la fisiografía. En el caso de referirse a vegetación en diferente estado fenológico, el método aportará unos resultados peores que si no es así.

El método es como sigue (Ranchin 2000): se aplica en primer lugar un análisis multiresolución, que no es sino la aplicación de un método basado en onditas (wavelets) que van recogiendo la información que se pierde entre sucesivos pasos de una pirámide en la que según se asciende, cada escalón es de menor resolución que el anterior. El proceso es inversible, pudiéndose recuperar la imagen sin pérdida de un paso al anterior. Las onditas utilizadas son:

$$WT_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$$

siendo $\overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)}$ el complejo conjugado de la función de onda ψ . Calculando para cada escala a y posición b de la señal $f(x)$ –la imagen en el dominio de la frecuencia- obtenemos la representación local de $f(x)$ y unos coeficientes $WF_f(a,b)$ que nos permiten reconstruir la imagen sin ninguna pérdida mediante la expresión:

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WT_f(a,b) \overline{\psi_{a,b}(x)} \frac{da db}{a^2}$$

donde C_ψ es la condición de admisibilidad de la ondata madre. Esto en el caso continuo, el discreto se deriva con facilidad de aquí.

El método ARSIS realiza una transformación multiresolución por medio de onditas en tres direcciones: vertical, horizontal y diagonal, esperando recoger así las estructuras existentes en estos tres ejes. En la práctica, las expresiones analíticas señaladas arriba se sustituyen por filtros de paso alto aplicándose mediante un banco de filtros que sintetiza las imágenes cada vez a menor resolución. Una vez alcanzado un umbral, se aplica un modelo empírico de transformación de coeficientes desde la imagen de más alta resolución a la de menor, restituyéndose después la imagen por medio de la transformada inversa. Los modelos difieren para cada tipo de fusión de imágenes. Por ejemplo, para el caso de la fusión de imágenes LANDSAT-TM canal 6 (120 m.) y LANDSAT-TM canal 4 (30 m.) los autores proponen el siguiente:

$$\begin{aligned} C^Z_{(TM6)60} &= a^Z C^Z_{(TM4)60} + b^Z \\ C^Z_{(TM6)30} &= a^Z C^Z_{(TM4)30} + b^Z, \end{aligned}$$

para Z = Coeficientes Diagonal, Vertical y Horizontal.

La capacidad de cada fusión depende tanto del modelo tomado como de las propias imágenes de partida. En este sentido, el método ha sido aplicado por diversos autores (Garguet-Dupont et al. 1994, 1996; Li et al. 1995; Zhou et al. 1998) con diferentes modelos, obteniéndose resultados variables en función de este particular. En la actualidad (2000) se trabaja con un modelo llamado ARSIS 2 que parece ser que ofrece mejores resultados al aplicarlo a diferentes cubiertas.

El método de fusión de datos mediante entropía (EDF)

El fundamento teórico del método que se propone (Tapiador y Casanova 2000), denotado *Entropy Data Fusion* (EDF) se basa en la asunción de que, en teoría, la irradiancia adquirida por un sensor de baja resolución espacial y multispectral (imagen que notaremos como $XS_{L\alpha}$, con a una banda determinada) es, en cada píxel y para cada banda, una función –en principio desconocida- de los

valores de radiancia correspondientes a los de una imagen de alta resolución espacial que cubran el mismo IFOV que la anterior. Es decir,

$$XS_{L\alpha} = F_\alpha (Pan_H) \tag{1}$$

Así, para cada píxel de la imagen $XS_{L\alpha}$, de resolución espacial R_1 , le corresponderá un conjunto de $n = (R_1/R_2)^2$ píxeles de la Pan_H , siendo R_2 la resolución espacial de la Pan_H . F_α es lineal, por las características de adquisición de ambos sensores – la radiación que se recibe en un píxel se puede suponer proveniente tan sólo de su IFOV correspondiente-, por lo que podemos escribir que, para un píxel,

$$XS_{L\alpha} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Pan_{Hi} + C \tag{2}$$

siendo c un valor que dependerá de la relación que exista entre las longitudes de onda a las que sean sensibles los sensores. En base a la hipótesis anterior se puede suponer, además, que

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

El número de posibles soluciones de esta ecuación de n incógnitas es muy elevado. Ahora bien, sólo una parte de éstas, muy pocas, estarán de acuerdo con la restricción de que

$$\langle XS_{L\alpha} \rangle = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Pan_{Hi} + C \tag{3}$$

notando $\langle XS_{L\alpha} \rangle$, como el valor medio de $XS_{L\alpha}$, restricción que supone la conservación de las propiedades radiométricas de la imagen de más baja resolución espacial en el conjunto. Además, de entre aquellas que satisfagan la restricción, sólo habrá un conjunto de p_i que sea el más probable con los datos iniciales, en el sentido de que ofrezca un mayor número posible de opciones. Para la determinación de los p_i conceptualizaremos a este conjunto como una distribución de probabilidad. Es inmediato comprobar cómo se satisfacen las condiciones necesarias. Definiremos también una magnitud, la *entropía de la información de la fusión*, de la manera habitual:

$$S = k \sum_{i=1}^n p_i \cdot L p_i \tag{4}$$

Con k una constante. S nos mide la incertidumbre del sistema. A mayor incertidumbre, mayor número de posibilidades de que la distribución sea la correcta. Según Jaynes (1990) el problema de la búsqueda de la distribución de probabilidad que

mejor se ajusta a la información que se tiene se reduce entonces a resolver

$$\max(-k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i) \text{ sujeto a las condiciones}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i = 1 \\ \langle X S_{L\alpha} \rangle = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \text{Pan}_{Hi} \end{cases} \quad (5)$$

Nótese que lo que se intenta es extraer el máximo de la información posible a partir de los datos con los que contamos. Si se tuviera más información, ésta podría ser incluida como restricciones adicionales –lo cual, por otra parte, complejiza la resolución del sistema-. En este sentido, el método es óptimo. El planteamiento inicial de Jaynes nace en la física estadística como un medio de búsqueda de la distribución de probabilidad de un sistema termodinámico en equilibrio. El mismo, en trabajos posteriores, señala la fácil traslación del método de entropía máxima y de su lógica subyacente a campos tan alejados como la demografía o la economía. La fusión de datos en teledetección.

Mediante transformaciones se llega al siguiente sistema de ecuaciones exponenciales:

$$\begin{cases} Z = \sum_i e^{-\beta \text{Pan}_{hi}} \\ Z \langle X S_{L\alpha} \rangle = \sum_i \text{Pan}_{Hi} e^{-\beta \text{Pan}_{hi}} \end{cases} \quad (7)$$

La resolución analítica de este sistema de ecuaciones requiere métodos numéricos. De hecho, la dificultad de aplicación del método de entropía máxima reside aquí. Una vez encontradas las soluciones, basta con sustituir las probabilidades en la ecuación (3) para obtener las probabilidades apriorísticas a asignar a la imagen resultado de la fusión. La aplicación del teorema de Bayes es entonces inmediata. Como muestra general del procedimiento de fusión, y de este método en particular, se ha recogido un caso extremo de fusión: la de una imagen NDVI NOAA-AVHRR con otra LANDSAT-ETM (Figura 1)

Otros métodos de fusión

Existe una panoplia considerable de otros métodos de fusión, derivados en mayor o menor medida de los señalados hasta aquí, elegidos precisamente por formar la base sobre la cual se van desarrollando otros modelos. Sin embargo, ninguno de ellos satisface la condición de encontrar la distribución más probable que se obtiene mediante el EDF. Por otro lado, las derivaciones propias de cada uno de ellos son innumerables. Se pueden señalar, a modo de inventario, los siguientes:

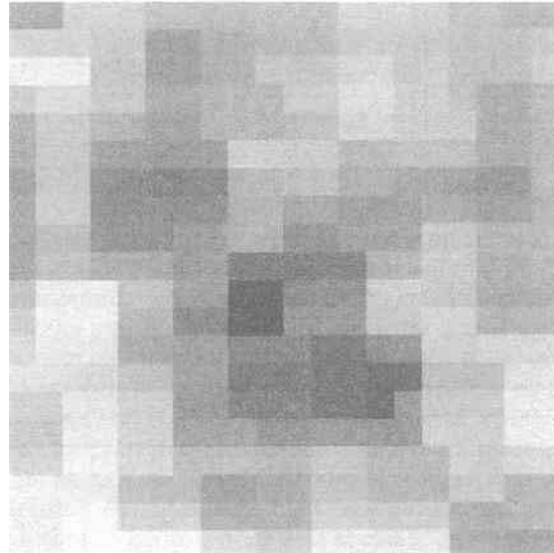


Figura 1a. Imagen de NDVI NOAA-AVHRR original.

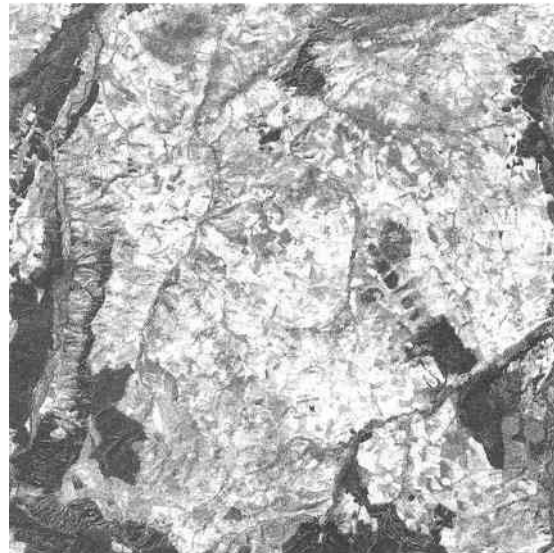


Figura 1b. Imagen LANDSAT-ETM compuesta original.

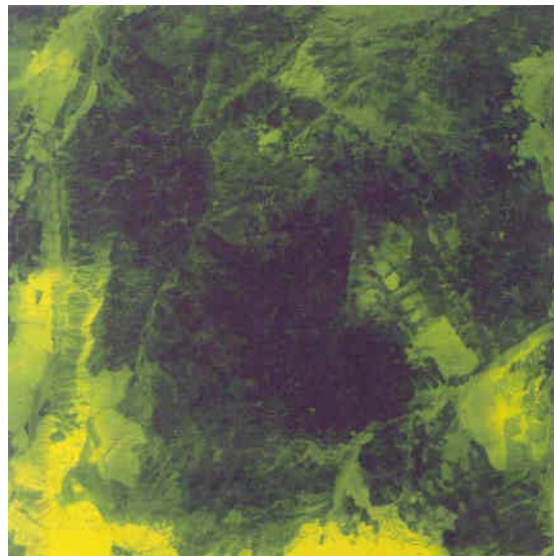


Figura 1c. EDF de NDVI. Resolución 30 metros

- Modelos markovianos (Ersbøll et al. 1998)
- Filtros de paso alto (Schowengerdt 1980)
- Normalización de imágenes (Ricchetti 2000)
- Correlación local (Diemer 2000)
- Integración contextual (Faber 1999)
- Pirámides laplacianas generalizadas (Aiazzi 1999)

CONCLUSIONES

La fusión de datos es un conjunto de técnicas que se han desarrollado en los últimos 5 años y cuya evolución es notable. El cada vez mayor número de sensores que observan la Tierra ha llevado a que una misma escena sea observada simultáneamente por dos o más de ellos. Este hecho ha llevado a la necesidad de desarrollar técnicas de fusión que permitan obtener el máximo beneficio de la sinergia entre ambas observaciones. Su utilidad reside en la capacidad de extraer información de sensores que carecen de alguna capacidad mediante el uso de otro sensor que posee información complementaria, utilizando técnicas matemáticas y modelos físicos complejos que optimizan las características de ambos sensores.

Por último, añadir que el campo de la fusión de datos no se circunscribe a las imágenes de satélite, sino que se puede considerar como tal la mezcla de información ráster y vectorial, la información posicional proporcionada por la constelación GPS e incluso la integración de medidas de campo y bases de datos convencionales con productos de satélite. No obstante, el término se circunscribe cada vez más hacia el contexto en el que lo hemos definido.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al personal del Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) su cooperación para los primeros estadios de implantación del método EDF, proceso en el cual amablemente colaboraron.

BIBLIOGRAFIA

- AIAZZI, B., ALPARONE, L., BARDUCCI, A., BARONTI, S., PIPPI, I. 1999. Assesment of noise variance and information content of multi/hyper spectral imagery. *ISPRS/EARSEL Workshop*, Valladolid.
- BARNES, E.M., M.S. MORAN, P.J. PINTER, Jr., y T.R. CLARKE. 1996. Multipsectral remote sensing and site-specific agriculture: Examples of current technology and future possibilities. *Proceedings of the 3rd Internation Conference on Precision Agriculture*.
- BORWEIN, J.M., LEWIS, A.S., NOLL, D. 1996. Maximum entropy reconstruction using derivative information, part I: Fisher information and convex duality. *Math. of Operational Research* 21.
- CHAVEZ, P.S., SIDES, S.C., ANDERSON, J.A., 1991, Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: LANDSAT TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 57: 295-303.
- DECARREAU, A., HILHORST, D., LEMARECHAL, C., NAVAZA, J. 1992. Dual methods in entropy maximization: Application so some problems in crystallography. *SIAM J. Optimization* 2.
- DIEMER, C., HILL, J. 2000. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions. *3rd Int. Conf. of Fusion of Earth Data*. 26-28 January. Sophia Antipolis. Francia.
- DSTO, (Defense Science and Technology Organization) 1994. Data Fusion Special Interest Group. *Data fusion lexicon*. Dept. of Defence. Canberra, Australia.
- EHLERS, M. 1991. Multisensor image fusion techniques in remote sensing. *ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 51: 311-316.
- ERSBØLL, B. K. et al. 1998. Fusion of SPOT HRV XS and orthophoto data using a markov random field model. *2nd Int. Conf. of Fusion of Earth Data*. Sophia Antipolis. France.
- HILL, J., DIEMER, C., STÖVER, O., UDELHOVEN, T. 1999. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions in forestry applications. *ISPRS/EARSEL Workshop on Fusion of Sensor Data, Knowledge sources and Algorithms for Extraction and Classification of Topographic Objects*. 3-4 June 1999. Valladolid.
- JAYNES. E. T. 1990. *Probability theory as Logic. Maximum-Entropy and Bayesian Methods*. P. F. Fougère (ed.), Kluwer, Dordrecht.
- LEVINE, R.D., TRIBUS, M (Ed). 1979. *The maximum entropy formalism*. MIT. Cambridge, MA.
- MANGOLINI, M. 1994. *Apport de la fusion d'images satellitaires multicapteurs au niveau pixel en teledetection et photo-interpretation*. M. Sc. Thesis. University of Nice-Sophia Antipolis. Francia.
- MOGHADDAM, M. 2000. Fusion of AIRSAR and TM data for variable classification and estimation in dense and hilly forests. *3rd Int. Conf. of Fusion of Earth Data*. 26-28 January. Sophia Antipolis. Francia.
- MUNECHIKA, C. K., WARNICK, J.S., SALVAGGIO, C., and SCHOTT, J.R., 1993. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 59: 67-72.
- POHL, C., TOURON, H. 2000. Issues and challenges of operational applications using multisensor image fusion. *3rd Int. Conf. of Fusion of Earth Data*. 26-28 January. Sophia Antipolis. Francia.
- RANCHIN, T., WALD, L., MANGOLINI, M. 1996. The ARSIS method: a general solution for improving spatial resolution of images by means of sensor fusion. *Proc. 1st Conf. Fusion of Earth Data*. 6-8 febrero, 53- 58.
- TAPIADOR, F.J., CASANOVA, J.L. 2001. An algorithm for the fusion of images based on Jaynes' maximum entropy method. *International Journal of Remote Sensing*. En prensa.
- TAPIADOR, F.J., 2001. *Fusión de imágenes de satélite mediante el método de entropía máxima de Jaynes*. Tesis doctoral. Departamento de Física Aplicada I. Universidad de Valladolid.
- WALD, L. 1999. Some terms of reference in data fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol 37, n.o 3.
- WALD, L., RANCHIN, T. 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: The ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 66, n.o 1: 49-61.
- ZHANG, Y. 1999. A new merging method and its spectral and spatial effects. *Int. J. Remote Sensing*. 20, n.o 10: 2003-2014.