

## **Ajuste radiométrico conjunto de varias imágenes de satélite para la realización de mosaicos de ortoimágenes**

*Guillermo Villa Alcázar*

Instituto Geográfico Nacional. Área de Teledetección

*Miguel Ángel Fernández Montoro*

Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria.

Servicio de Explotación y Sistemas

### RESUMEN

El método habitual para ajustar la radiometría de dos imágenes de satélite para poder hacer el mosaico de las mismas es aplicar a los valores radiométricos de una de ellas una transformación lineal que iguale la media y desviación típica de cada banda en ambas imágenes. Se describe un algoritmo que permite generalizar este método a un número cualquiera de imágenes, ajustándose todo el conjunto por mínimos cuadrados.

### ABSTRACT

The usual method for the radiometric adjustment of two images in order to be able to make a mosaic is to apply a linear transform to the radiometric values of one of the images that makes equal the values of mean and standard deviation in both images for each band. An algorithm is described that allows the generalization of this method to any number of images, and the whole set is adjusted by the least squares method.

### *Introducción*

Uno de los problemas que surgen al hacer mosaicos de imágenes de satélite de distintas fechas es el de las diferencias radiométricas entre ellas. Debido a los cambios en las condiciones de toma (altura y acimut del sol, ángulo de incidencia, condiciones atmosféricas...) así como la calibración del sensor y los cambios en el terreno (humedad, vegetación, topografía...), las imágenes difieren mucho de unas a otras.

Estas diferencias tienen un doble aspecto:

- Diferencias radiométricas para la misma zona en distintas imágenes.
- Diferencias radiométricas para la misma imagen entre distintas zonas.

Las primeras dificultan la realización del mosaico, pues se apreciaría demasiado la unión. Las segundas hacen que los cambios que se observan sobre la imagen puedan no ser debidos a cambios en el terreno, sino a una cualquiera de las causas anteriores.

Hay dos enfoques para afrontar este problema:

1) *Corrección física o "determinista"*: intentar conocer todas las circunstancias de la toma de la imagen y mediante modelos físicos adecuados (del comportamiento radiométrico de la atmósfera, de la reflectancia bidireccional del terreno, del sensor, etc.) pasar de valores digitales a valores de reflectancia vertical para cada uno de los pixels.

Este enfoque, a pesar de ser el más lógico a priori, tiene graves inconvenientes que han hecho que los resultados obtenidos hasta el momento sean muy parciales (Abern et al, 1988). En efecto:

- No conocemos con suficiente precisión la composición, y por tanto el comportamiento radiométrico, de la atmósfera en cada punto y en cada instante.
- No conocemos tampoco las reflectancias bidireccionales de cada pixel.
- La calibración del sensor es solamente aproximada.
- Las variaciones en la respuesta radiométrica del terreno (por cambios de vegetación y humedad del suelo) son prácticamente imposibles de modelizar y corregir físicamente.

2) *Corrección "empírica"*: se basa en comparar las distintas imágenes entre sí a través de las zonas que tienen en común, y sacar conclusiones sobre las variaciones entre ellas, modelizar estas variaciones y corregirlas aplicando una transformación a cada imagen que iguale los valores digitales de las distintas imágenes para esas zonas comunes.

Si lo que buscamos no es una corrección completa o "calibración absoluta" de las imágenes, conformándonos con una calibración o corrección "relativa" que elimine las diferencias entre unas imágenes y otras debidas a todas las causas explicadas anteriormente, podemos acudir a un método empírico de corrección.

### ***Método propuesto. Objetivos***

#### ***Caso de dos imágenes***

El método empírico que se suele utilizar para ajustar radiométricamente dos imágenes se basa en suponer que, para cada banda, existe una relación lineal entre los valores digitales de ambas imágenes. Esta suposición, que puede parecer gratuita, no lo es tanto ya que la mayoría de los factores que producen variaciones radiométricas tienen expresiones lineales.

Dadas dos imágenes con una zona común o de solape, se trata de calcular la transformación a aplicar a la imagen 2 para hacerla coincidir con la 1. Para ello, nos basamos en los valores de media ( $m$ ) y desviación típica ( $s$ ) de los valores digitales

en una o varias áreas "de control" coincidentes en ambas imágenes, situadas dentro de la zona de solape. (Evidentemente es necesario tomar áreas que no contengan nubes ni ningún otro elemento distorsionante).

– Sean las estadísticas en el área de control:

$(m_1, s_1)$  para la imagen 1

$(m_2, s_2)$  para la imagen 2

Si llamamos  $x_1$  a los valores radiométricos en la imagen 1, y  $x_2$  a los de la imagen 2, la transformación a aplicar será de la forma:

$$x_2' = a \cdot x_2 + b$$

La constante multiplicativa  $a$  (pendiente de la recta que representa a la transformación) se suele llamar Ganancia, y la constante aditiva  $b$  (ordenada en el origen) se suele llamar Bias u Offset.

Al aplicar una transformación lineal de este tipo a los valores de una muestra estadística, las nuevas media y desviación típica serán:

$$\begin{aligned} m_2' &= a \cdot m_2 + b \\ s_2' &= a \cdot s_2 \end{aligned}$$

y como queremos que las estadísticas de la imagen 2 ajustada coincidan con las de la imagen 1 ( $m_2' = m_1$ ;  $s_2' = s_1$ ) tendremos que aplicar a la imagen 2 una Ganancia y Bias al efecto:

$$\begin{aligned} a &= s_1 / s_2 \\ b &= m_1 - (a \cdot m_2) \end{aligned}$$

### *Caso de varias imágenes*

Si, partiendo de una imagen, fuésemos ajustando la segunda imagen a la primera, la tercera a la segunda, etc, y la enésima imagen tuviese contacto con la primera, debido a la acumulación de errores la transformación calculada para la enésima imagen produciría un resultado que se diferenciaría grandemente de la primera. Los "errores" que se producen provienen de la no coincidencia exacta de las zonas de control y, sobre todo, de la imperfección de la hipótesis de regresión lineal entre dos imágenes. Para evitar esto, el método que proponemos realiza un ajuste simultáneo por mínimos cuadrados de todas las relaciones lineales entre las distintas imágenes. El desarrollo matemático es una generalización del caso de dos imágenes:

Suponemos que cada banda de una imagen  $i$  se corrige aplicándole una transformación lineal del tipo:

$$x_i' = a_i \cdot x_i + b_i$$

donde

$x_i$  : valores digitales de la imagen  $i$  antes del ajuste

$x_i'$  : valores digitales ajustados o "corregidos"

$a_i, b_i$  : coeficientes de la transformación a aplicar a la imagen  $i$

Para determinar los  $n$  pares de constantes ( $a_i, b_i$ ),  $i = 1, \dots, n$  ( $n$ : número de imágenes a ajustar), nos basamos en las estadísticas de las zonas de control entre cada dos imágenes con solape.

Sean éstas ( $m_i, s_i$ ) para la imagen  $i$  y ( $m_j, s_j$ ) para la imagen  $j$ . Imponemos que dichas estadísticas se igualen después del ajuste:

$$\begin{aligned} m_i' &= m_j' \\ s_i' &= s_j' \end{aligned}$$

Los valores de media y desviación típica después de la transformación lineal serán, para la imagen  $i$ :

$$\begin{aligned} m_i' &= a_i \cdot m_i + b_i \\ s_i' &= a_i \cdot s_i \end{aligned}$$

y para la imagen  $j$ :

$$\begin{aligned} m_j' &= a_j \cdot m_j + b_j \\ s_j' &= a_j \cdot s_j \end{aligned}$$

Con lo cual, cada relación entre dos imágenes nos produce las dos ecuaciones lineales siguientes:

$$\begin{aligned} a_i \cdot m_i + b_i &= a_j \cdot m_j + b_j \\ a_i \cdot s_i &= a_j \cdot s_j \end{aligned}$$

es decir:

$$\begin{aligned} m_i \cdot \mathbf{a}_i - m_j \cdot \mathbf{a}_j + 1 \cdot \mathbf{b}_i - 1 \cdot \mathbf{b}_j &= 0 \\ s_i \cdot \mathbf{a}_i - s_j \cdot \mathbf{a}_j &= 0 \end{aligned}$$

(las incógnitas son las que van en negritas)

Cada imagen introduce dos incógnitas **a** y **b**, coeficientes de la transformación lineal a aplicarle.

Como una de las imágenes puede actuar de "referencia" (no sufre ninguna transformación, ajustándose las demás a ella) tendremos dos ecuaciones más:

$$\begin{aligned} a_{ref} &= 1 \\ b_{ref} &= 0 \end{aligned}$$

En las ecuaciones en las que intervenga la imagen de referencia habrá que eliminar las incógnitas  $a_{ref}$  y  $b_{ref}$ , para que no entren en el ajuste posterior por mínimos cuadrados, y no modifiquen sus valores. Así, en el caso

$$i = \text{referencia} \implies a_i = 1 ; b_i = 0$$

las ecuaciones serán:

$$\begin{aligned} -m_j \cdot \mathbf{a}_j - 1 \cdot \mathbf{b}_j &= m_i \\ -s_j \cdot \mathbf{a}_j &= s_i \end{aligned}$$

y en el caso

$$j = \text{referencia} \implies a_j = 1 ; b_j = 0$$

y por tanto:

$$\begin{aligned} m_i \cdot \mathbf{a}_i + 1 \cdot \mathbf{b}_i &= m_j \\ s_i \cdot \mathbf{a}_i &= s_j \end{aligned}$$

Si queremos ajustar **n** imágenes con **m** relaciones entre ellas, tendremos un sistema de  $(2m+2)$  ecuaciones con  $(2n)$  incógnitas. Aquí, de forma similar a las altitudes de una red de nivelación geodésica, hay una serie de medidas "mínimas" y otras, a priori innecesarias, que se hacen para tener comprobación y evitar la acumulación de errores.

Si se realizan sólo las medidas imprescindibles, tendremos un sistema de ecuaciones compatible determinado, con tantas ecuaciones como incógnitas. Si se realizan medidas adicionales, el sistema será sobredeterminado (más ecuaciones que incógnitas).

En general, tendremos un sistema lineal del tipo:

$$A \cdot X = B$$

donde:

A = matriz de coeficientes que se deducen de las ecuaciones anteriores.

B = vector de términos independientes que se deducen de las ecuaciones anteriores.

X = (a1, a2,..., an, b1, b2,..., bn)<sup>T</sup> es el vector columna de las incógnitas.

El problema consiste en encontrar el vector X' que corresponde a la mejor solución. Utilizando el conocido criterio de mínimos cuadrados (que hace mínima la suma de los cuadrados de los residuos), sabemos por Cálculo Numérico que la solución X' se obtendrá resolviendo el "sistema normal" de 2n ecuaciones con 2n incógnitas:

$$(A^T \cdot A) \cdot X' = A^T \cdot B$$

Si por algún motivo hay relaciones que nos ofrecen menos confianza o que tienen menor importancia que otras, podemos asignarles distintos pesos p<sub>i</sub> (i = 1,...,n) a cada una de ellas, con los cuales configuraríamos la matriz diagonal de pesos P, y resolveríamos el sistema:

$$(A^T \cdot P \cdot A) \cdot X' = A^T \cdot P \cdot B$$

Una ventaja de este algoritmo es que es totalmente general, y vale tanto para el caso trivial de 2 imágenes y una relación entre ellas, como para los casos más complicados.

Por ejemplo, una imagen de nueva fecha que se tiene que ajustar a un grupo de imágenes previamente ajustado, sin modificar a estas últimas. O bien un grupo de imágenes que queremos ajustar entre sí y con las del primer grupo, ya ajustado, y sin modificar a éste. (Estos casos se pueden dar cuando se añade una nueva zona de territorio o cuando se quieren ajustar imágenes de nueva fecha de la misma zona). En este caso tendríamos varias imágenes de referencia (las imágenes del primer grupo que tengan contacto con el segundo) y cada una de ellas proporcionaría dos ecuaciones más. Pero no habría que eliminar las incógnitas (a, b) en las ecuaciones en que

intervengan, como hicimos en el caso de referencia única. De este modo, entrarían todas las conexiones en el ajuste por mínimos cuadrados.

Si hay varias escenas de la misma fecha, se pueden considerar como la misma escena en el cálculo, aun cuando estén separadas físicamente.

**Resultados**

En el Área de Teledetección del IGN hemos ajustado las 28 imágenes Thematic Mapper de un recubrimiento completo de la España peninsular, con distintas fechas entre junio y septiembre de los años 1985 a 1987. En algunos casos se han ajustado varias escenas de la misma zona y distinta fecha, debido a adquisiciones posteriores. Igualmente se va a utilizar este método para añadir a este mosaico 8 escenas de Portugal a fin de completar toda la Península Ibérica.

En el Cuadro 1 se muestran las estadísticas de las zonas comunes entre ocho escenas de Andalucía, antes y después del ajuste, para la banda 5 de Thematic Mapper.

La Figura 1 es un mosaico realizado con las imágenes sin ajustar y la Figura 2 el mismo mosaico realizado con las imágenes ajustadas. Como se puede ver, las diferencias después de ajustar son bastante pequeñas y permiten mosaicar sin problemas si se da un tratamiento adecuado a la línea de unión.

Imágenes	$\mu_1$	$\mu_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\mu_1'$	$\mu_2'$	$\sigma_1'$	$\sigma_2'$
1 - 2	135.6	122.2	31.0	7.7	148.6	147.9	31.0	31.0
2 - 3	104.7	128.7	25.7	8.3	128.3	128.7	28.8	28.3
3 - 4	129.1	111.7	36.2	0.3	129.1	129.3	36.2	31.3
4 - 1	111.7	115.5	30.7	31.3	129.3	128.5	31.7	31.3
3 - 6	140.1	150.9	36.4	37.7	140.1	141.3	36.4	35.9
6 - 5	118.4	118.2	36.7	36.6	110.3	111.5	35.0	35.5
5 - 2	135.6	105.8	36.5	31.6	128.3	129.5	35.4	35.4
4 - 8	108.6	114.7	42.2	47.6	126.1	127.0	43.6	40.5
8 - 7	105.6	57.6	37.2	21.2	119.2	120.1	31.7	27.9
7 - 3	63.8	129.2	25.7	30.5	128.3	129.2	33.8	30.5

Cuadro 1

Estadísticas para la Banda 5 de las zonas comunes de 8 imágenes Landsat Thematic Mapper sobre Andalucía, antes y después del ajuste radiométrico

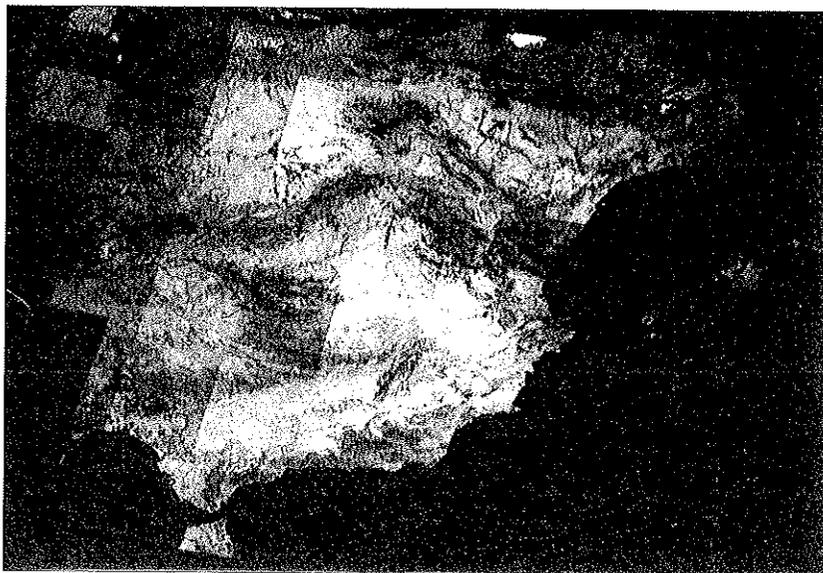


Figura 1  
Mosaico de 28 imágenes TM sin ajuste radiométrico. (A. 40)

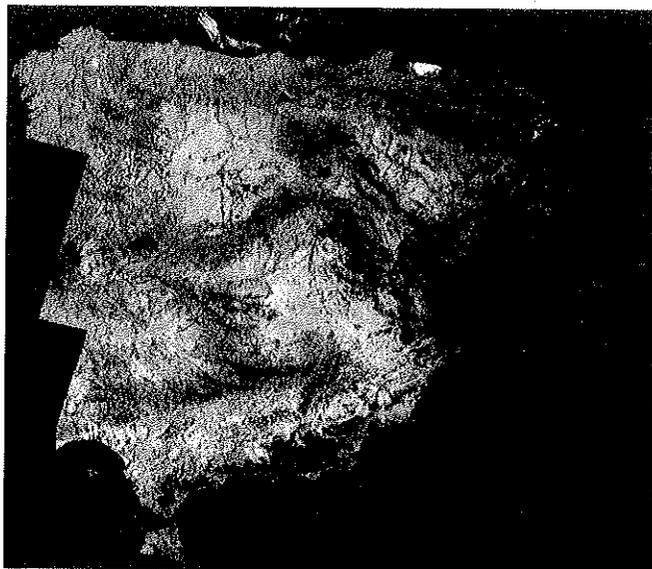


Figura 2  
Mosaico de las mismas imágenes, después del ajuste. (A. 41)

Este ajuste ha permitido que las series de Ortoimágenes Espaciales 1/100.000, 1/250.000 y 1/500.000 presenten continuidad de tonos entre las distintas hojas. Para conseguirlo, además del ajuste descrito ha habido que aplicar unos realces que conserven dicha continuidad, para lo cual se han desarrollado dos métodos distintos. La continuidad entre hojas ha permitido también realizar las hojas de la serie 1/250.000 simplemente uniendo 4 hojas 1/100.000, y permitirá en breve realizar el 1/1.000.000 uniendo las hojas 1/500.000 remuestradas.

### ***Consideraciones adicionales***

#### ***Cambios de vegetación***

Cuando entre dos imágenes hay cambios de cobertura vegetal importantes, la hipótesis de regresión lineal entre ellas deja de ser válida. Si calculamos las estadísticas sin más y aplicamos el proceso anterior resultará que, para compensar los cambios de vegetación, el conjunto de la imagen sufrirá una transformación exagerada, quedando con un aspecto muy extraño. En este caso es conveniente eliminar los píxels que han cambiado de vegetación del cálculo de las estadísticas.

#### ***Imágenes de las islas***

En las imágenes sobre las Baleares y las Canarias, no tenemos conexiones directas con la Península (aunque en algunos casos sí las hay entre distintas islas). Para ajustar estas escenas a las de la Península, no nos podemos basar en el método anterior, y hay que intentar hacer una "corrección física" lo mejor posible.

#### ***Corrección por altura del sol***

Si además de "continuidad" entre las distintas escenas pretendemos que haya "homogeneidad" a lo largo de todo el territorio, también es necesaria una cierta corrección física. En efecto: dentro de una misma órbita, el satélite va desplazándose de norte a sur disminuyendo su latitud y, por tanto, va aumentando la altura del sol sobre el terreno. A pesar de que al mismo tiempo se produce un avance hacia el oeste que la hace disminuir, el efecto global es un aumento de 1° aproximadamente en cada escena TM (180 km.). Esto tendrá una influencia en los valores radiométricos que, realizando un cálculo sencillo, se puede evaluar en un 8% entre el norte y el sur de la Península, si suponemos que toda la energía captada por el sensor ha sido reflejada en la superficie terrestre. Como en realidad una parte significativa ha sido difundida por la atmósfera, el efecto final queda bastante disminuido.

#### ***Realce de las imágenes***

Como hemos comentado antes, si se pretende conservar las ventajas de continuidad y homogeneidad tonal después del proceso de realce de las imágenes, es impres-

cindible buscar un método que las conserve aunque, en lo posible, se adapte a la radiometría de las distintas zonas.

#### ***Indicatriz de reflectancias***

En todo el razonamiento anterior, hemos supuesto despreciable el efecto del cambio en la reflectancia del terreno en función del ángulo de visión (hemos supuesto un terreno lambertiano). Estos cambios tendrían influencia en las conexiones entre distintas órbitas, pero no en las conexiones entre distintas escenas de la misma órbita. En el caso de las imágenes TM con las que hemos trabajado, los ángulos de incidencia son siempre pequeños ( $\pm 7.5^\circ$ ), pero en el caso de las imágenes SPOT de tomas oblicuas sería un problema a estudiar atentamente.

#### ***Fotos aéreas***

Desafortunadamente, el método descrito no es aplicable a los mosaicos de ortofotos digitales, debido a las grandes aperturas de campo de las cámaras aéreas. En este caso (Villa, 1987) hay elementos como la indicatriz de reflectancia bidireccional, la diferencia de caminos ópticos a través de la atmósfera, el "vignetting" y la disminución angular de la luminosidad del objetivo (Slater, 1980) que tienen una gran influencia y no se pueden despreciar.

#### ***Bibliografía***

Ahern, F.J.: et al. 1988. Radiometric correction of visible and infrared remote sensing data at the Canada Centre for Remote Sensing. En *Remote Sensing Yearbook 1988/89*. A. Cracknell and L. Hayes (Eds.) 8: 101:127. Taylor & Francis. London.

Slater, P.N.: 1980. *Remote Sensing optics and optical systems*.

Villa, G. 1987. Corrections radiométriques de photographies aériennes n & b numérisées en vue de la réalisation de mosaïques d'ortophotos: une méthode polynomiale. Mémoire de stage du DESS. Université Paris VI.