

COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS TEMPORALES

Gregorio Ambrosio, Javier González, Vicente Arévalo
Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga.
Campus de Teatinos. 29071 Málaga.
e-mail: {goyo, jgonzalez, varevalo}@ctima.uma.es

Resumen

La disponibilidad comercial en los últimos años de imágenes de satélite de alta resolución constituye una inestimable fuente de información para la gestión urbanística de ayuntamientos y administraciones con competencias territoriales. En particular, la comparación automática de este tipo de imágenes facilita enormemente la detección, control y seguimiento de obras y otras alteraciones paisajísticas como vertidos incontrolados, movimiento de tierras, etc. En este trabajo se describe un procedimiento de detección de cambios basado en la búsqueda automática de puntos de control una secuencia multi-temporal de imágenes. El método propuesto ha sido aplicado satisfactoriamente a imágenes del satélite IRS de la ciudad de Málaga, integrando los resultados en el SIG del Ayuntamiento de Málaga.

Palabras Clave: Corrección geométrica y radiométrica, detección de cambios, serie temporal de imágenes, sistema de información geográfica.

1 INTRODUCCIÓN

La detección de cambios a partir de una secuencia multi-temporal de imágenes de satélite es una de las aplicaciones más importantes en teledetección. Como es bien sabido, este proceso requiere de una adecuada corrección radiométrica y geométrica de las imágenes, de manera que los cambios detectados sólo sean atribuibles a verdaderas modificaciones del paisaje.

La comparación de imágenes multi-temporales se ha venido empleando fundamentalmente en la detección de cambios en la cubierta terrestre, para seguir la evolución de áreas forestales, superficies quemadas, desastres naturales, recursos naturales, crecimiento urbano, etc. ([5], [6], [7], [9]). La mayoría de estas aplicaciones emplean sensores como Landsat TM, NOAA-AVHRR, SPOT, etc., que abarcan un gran área, con una resolución insuficiente para captar detalles propios de un escenario urbano.

En los últimos años, gracias a la creciente disponibilidad comercial de imágenes de satélite de alta resolución (IRS 1C/1D, Ikonos, QuickBird, etc.), se abre un apasionante abanico de aplicaciones en el ámbito de la gestión y control urbanístico. En este trabajo se describe un procedimiento automático para la comparación de imágenes, basado en la búsqueda automática de puntos de control que permiten una precisa y robusta corrección geométrica de las imágenes. El sistema completo está siendo aplicado desde hace varios años a imágenes pancromáticas del IRS (5.8m./píxel) y los resultados integrados en el sistema de información geográfica del Ayuntamiento de Málaga.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. A continuación se presenta una visión general del proceso de detección de cambios implementado. En el apartado 3 y 4 se detallan los procedimientos de corrección radiométrica y geométrica, respectivamente. Después se explica brevemente como se obtiene la imagen de cambios y se muestran algunos resultados. En el apartado 6 se comenta el SIG del Ayuntamiento de Málaga en el cual se han integrado los resultados de la detección de cambios. Finalmente se presentan algunas conclusiones.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

La figura 1 muestra, de manera ilustrativa, el funcionamiento general del sistema. La entrada es el par de imágenes pancromáticas que van a ser comparadas. Con objeto de que la imagen de cambios resultante pueda integrarse en un SIG, la primera imagen de la secuencia (imagen 0) es corregida geoméricamente mediante puntos de control terrestres (GCP) que permite una transformación image-to-map, como se explicará en los subapartados 3.1 y 3.2. Nótese que, aunque esta primera etapa requiere de la intervención de un operador que seleccione en la imagen aquellos píxeles correspondientes a los puntos de control, este proceso sólo se realiza una vez, en esta primera imagen de la secuencia.

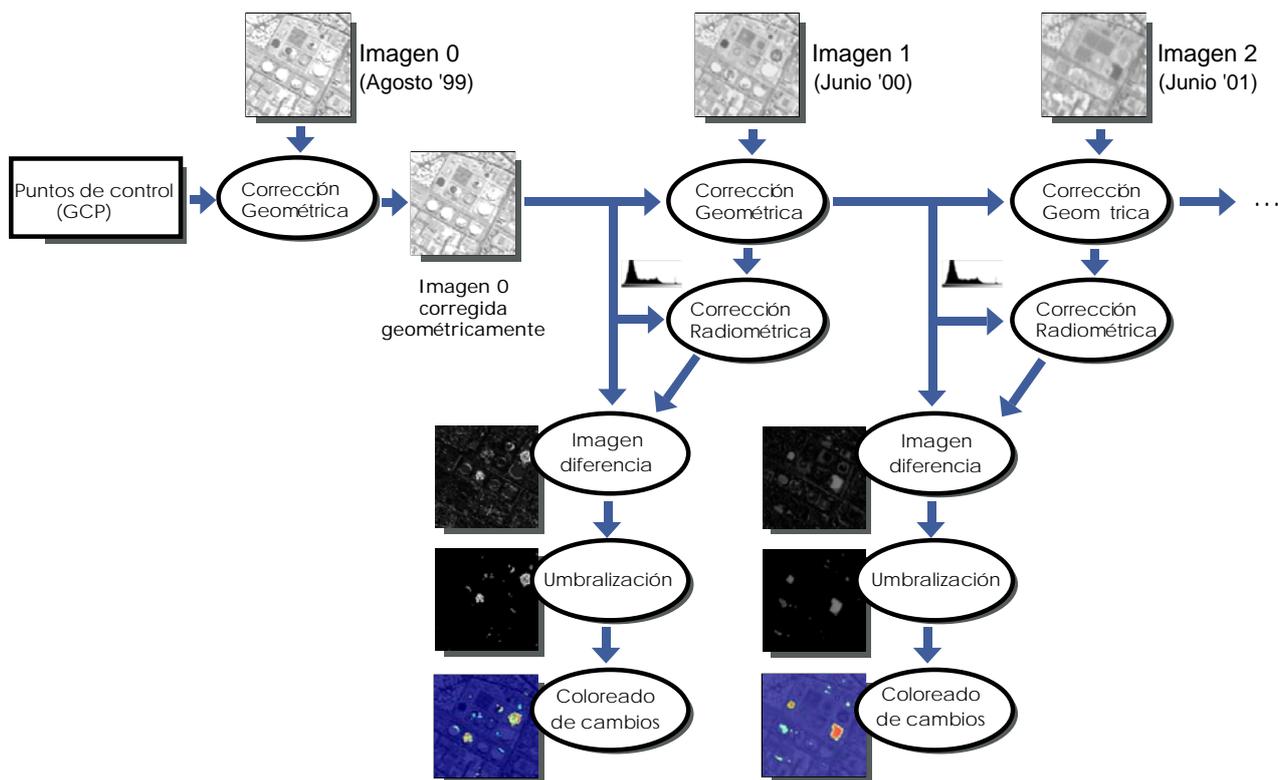


Figura 1: Representación esquemática del proceso general de detección de cambios.

De manera esquemática, el sistema trabaja siguiendo las siguientes etapas:

1. Se buscan automáticamente parejas de puntos de control en el par de imágenes a comparar. Mediante estos pares de puntos, la segunda imagen es corregida geoméricamente según una transformación polinomial y una interpolación de niveles de grises mediante convolución cúbica ([1], [2], [3]).
2. Puesto que las imágenes son captadas bajo diferentes condiciones atmosféricas y de iluminación, éstas son compensadas radiométricamente.
3. Se obtiene la imagen de cambios mediante la diferencia de niveles de grises. Luego se umbraliza para eliminar cambios poco significativos y se codifica con colores para representar la intensidad de los cambios detectados.

A continuación se describe con más detalles cada una de las etapas de la aplicación, las cuales han sido programadas en el lenguaje C++.

3 CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Este proceso conlleva la transformación de las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen de tal forma que coincidan de manera precisa con las de la primera (imagen de referencia). Se realiza mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control de ambas imágenes. A continuación se describe con mayor detalle este proceso.

3.1 LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL

La detección automática de pares de puntos de control en las imágenes es esencial para que el sistema tenga éxito puesto que ellos son los que establecen las relaciones geométricas entre las imágenes. Estos puntos, en un número suficiente para hacer frente a los inevitables problemas de emparejamiento erróneos, han de ser lo más precisos posible (con precisión subpíxel) y estar uniformemente distribuidos por toda la imagen. Para lograr esto, primero se trocea la imagen en cuadros (por ejemplo de 128x128 píxeles) en los que se buscan los puntos de control¹. Si bien existen

¹ Una imagen pancromática del IRS del área metropolitana de Málaga son 5120x5120 píxeles, lo que genera 40x40 cuadros de 128x128 píxeles.

diferentes métodos para efectuar esta búsqueda, por su robustez y precisión se ha optado por el algoritmo KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) ([8], [10]). Lógicamente, para lanzar el procedimiento de búsqueda es necesario un mínimo alineamiento y desplazamiento entre las imágenes que, de ser necesario, puede realizarse manualmente. La figura 2 muestra un ejemplo donde se aprecia la división de la imagen y los puntos de control detectados en ella. Obsérvese que no en todos los cuadros se encuentran puntos.

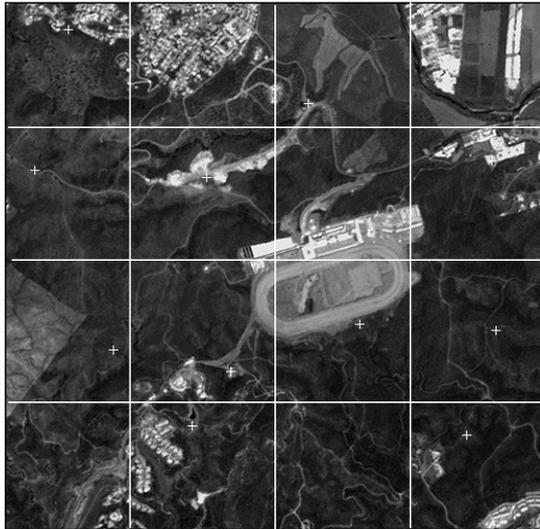


Figura 2: División de la imagen en sub-imágenes con los puntos de control detectados por el algoritmo KLT (marcados con +).

Debe señalarse también que pueden existir grandes zonas de la imagen donde los pares de puntos de control son poco o nada fiables (por ejemplo en el mar, donde el oleaje da lugar aleatoriamente a numerosos puntos de interés, sin relación entre los de una y otra imagen). Aunque el algoritmo, como después se comenta, es capaz de descartar pares espúreos de puntos mal emparejados, en este caso es conveniente eliminar manualmente estas zonas mediante el recorte poligonal de la primera imagen de referencia (se realiza, por tanto, una sola vez).

3.2 TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

Los pares de puntos de control obtenidos son empleados para calcular los coeficientes del sistema polinomial mediante el cual se realiza la transformación de coordenadas a la nueva imagen corregida. En particular, las expresiones utilizadas son:

$$\begin{aligned} x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \\ y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy \end{aligned} \quad (1)$$

donde (x', y') y (x, y) son las coordenadas de los píxeles de la imagen corregida y sin corregir, respectivamente. Nótese que este modelo puede manejar deformaciones lineales como cambios de escala, desplazamiento, rotación, etc. Los 8 coeficientes de estas dos ecuaciones son calculados mediante un ajuste de mínimos cuadrados iterativo en el que se van descartando aquellos pares de puntos que contribuyen con más error al residuo del ajuste. En nuestro caso, se empieza empleando unos 1100 pares de puntos (uno por cada sub-imagen), y se van eliminando aquellos cuyo error es superior a 1 píxel, convergiendo a un número, normalmente, en torno a 500 pares.

3.3 TRANSFORMACIÓN DE NIVELES DE GRIS

Ahora se procede a calcular el nivel de gris de los píxeles en la nueva imagen corregida empleando una convolución cúbica que promedia el valor de 16 vecinos. Este procedimiento de remuestreo, aunque más costoso computacionalmente que otros (vecino más próximo o interpolación lineal) produce una mejor estimación del nivel de gris ([1], [2], [3]).

4 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

Idealmente, cualquier superficie capturada en dos imágenes de satélite diferentes (con el mismo sensor) debería aparecer con los mismos valores de intensidad. En la práctica, esto nunca es así debido a las inevitables diferentes condiciones atmosféricas y de iluminación, por lo que se hace necesaria la corrección radiométrica de las imágenes. Se han estudiado dos alternativas: la corrección radiométrica absoluta utilizando un modelo analítico, y la corrección mediante una transformación de niveles basada en el histograma (corrección radiométrica relativa).

La primera se descartó porque el modelo requerido es extremadamente complejo, con multitud de parámetros (algunos de ellos desconocidos) relativos a la órbita del satélite, las condiciones atmosféricas locales, variaciones estacionales y geométricas, nubosidad, lluvia, etc. ([3]). Por tanto, se ha implementado el segundo enfoque, denominado *especificación de histograma*, que consiste en modificar el nivel de intensidad de un píxel de la imagen a corregir mediante una transformación tal que el histograma de la imagen resultante presente un histograma similar al de la imagen de referencia ([4]). Nótese que, el que los histogramas sean similares significa que el brillo medio, contraste y distribución de niveles de grises sean también parecidos. Esta técnica funciona mejor mientras

mayor sea el número de píxeles y, sobre todo, de niveles de grises. Para las imágenes que se han utilizado (5120x5120 píxeles y 256 niveles) los resultados son bastante aceptables (ver figura 3).

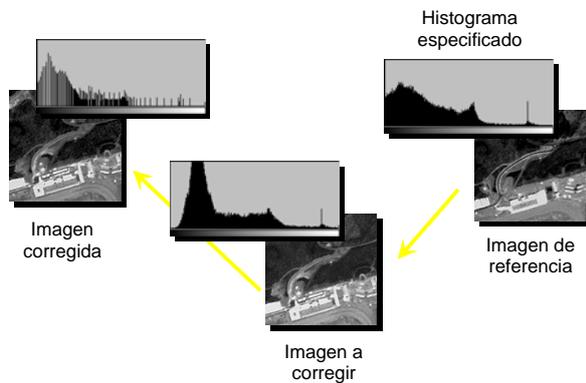


Figura 3: Histogramas de las tres imágenes involucradas en el proceso de especificación de histograma que realiza la corrección radiométrica.

5 OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE CAMBIOS

Una vez que la imagen ha sido geométrica y radiométricamente corregida se obtiene la *imagen de cambios* restando ésta a la de referencia, y tomando el valor absoluto de los valores resultantes. A partir de ésta, la imagen de cambios se determina mediante:

1. Umbralización para descartar cambios poco acusados debidos a ruidos, imperfecciones en la corrección radiométrica, etc.
2. Filtrado mediante un operador morfológico para eliminar píxeles aislados y regiones de muy pocos píxeles.
3. Codificación mediante colores (paleta frío-caliente) de la intensidad de los cambios (ver figura 4).



Figura 4: Arriba: trozos de las dos imágenes comparadas. Se muestra parte del puerto de Málaga. Abajo: imagen de cambios superpuestas a la imagen de referencia (Junio, 1999). Puesto que las imágenes no son reproducidas aquí en color, los cambios más intensos se perciben con tonos más claros.

6 INTEGRACIÓN DE LA IMAGEN DE CAMBIOS EN UN SIG

El tamaño del área metropolitana de Málaga y su término municipal es de unos 30x30 Km., aproximadamente, lo que da una clara idea de la dificultad de la tarea de inspección y control urbanístico. Asimismo, muchas de las irregularidades tienen lugar en recintos cerrados o azoteas no visibles mediante inspecciones regulares desde el terreno. El sistema de detección de cambios desarrollado, además de detectar estas actuaciones urbanísticas, permite llamar la atención de los inspectores sobre las áreas concretas a inspeccionar.

En particular, el sistema de información geográfica (SIG), desarrollado por el Centro Municipal de Informática del Ayuntamiento de Málaga, combina fotos aérea y de satélite con la cartografía digital y con una base de datos alfanumérica. Lógicamente, la integración de la imagen de cambio con el SIG es posible gracias a la previa georreferenciación y corrección espacial de las imágenes empleadas, lo que permite que los cambios detectados coincidan espacialmente con la cartografía digital. El sistema, desarrollado sobre el entorno Bentley's Microstation, proporciona a los técnicos de urbanismo una potente

aplicación para acceder a los datos desde un interfaz simple y amigable. Las figuras 5, 6 y 7 muestran algunos ejemplos de la aplicación.

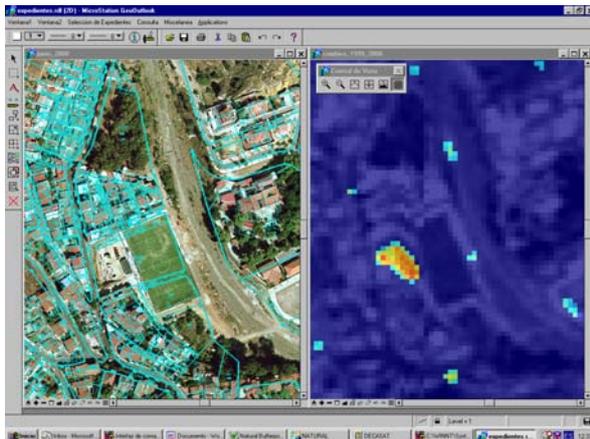


Figura 5: Trabajos de mejora del aparcamiento de un campo de fútbol. Si un operador amplía la imagen de cambios, la imagen aérea correspondiente se muestra en el panel de la izquierda. La región de mayor tamaño en el panel de la derecha corresponde con el movimiento de tierras del aparcamiento, los más pequeños son construcciones. Todos estos cambios fueron contrastados positivamente por los técnicos de urbanismo mediante inspección sobre el terreno.

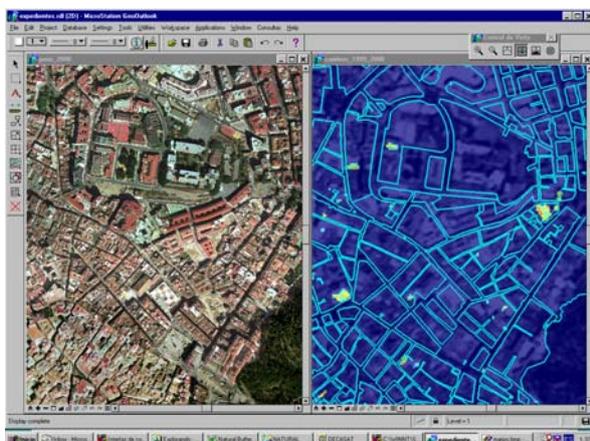


Figura 6: Interfaz de la aplicación usada en la supervisión del proceso de rehabilitación del casco histórico de Málaga. En el panel izquierdo se muestra una foto aérea y el de la derecha la imagen de cambios con la cartografía superpuesta. Las regiones más claras indican las zonas que se han rehabilitado o que se están rehabilitando en el último año.

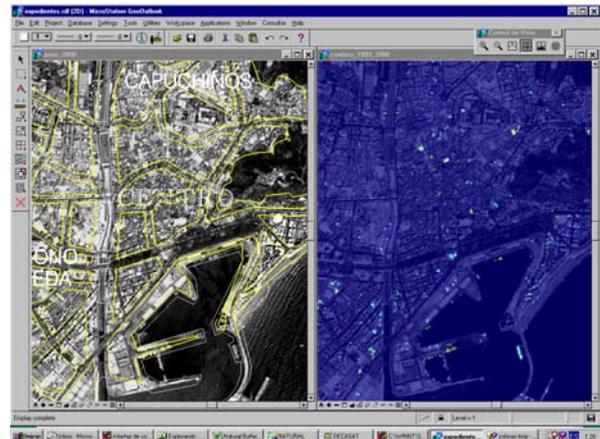


Figura 7: Zona del puerto y centro de Málaga. Izquierda: Imagen del IRS con la cartografía superpuesta. Derecha: Imagen de cambios.

6 CONCLUSIONES

Hoy en día existen satélites comerciales que captan imágenes digitales de una resolución suficiente como para recoger la aparición de nuevas construcciones y, en general, de modificaciones en el paisaje urbano. Tradicionalmente, en el ámbito del control y gestión urbanística, las tareas de inspección se realizan en el propio terreno o mediante comparación visual de fotografías aéreas. Cualquiera de estas dos alternativas presentan importantes limitaciones, bien por el coste en tiempo (dinero) o bien por ser propensas a errores de interpretación (por acción y omisión).

En este trabajo se ha descrito un sistema informático que, automáticamente, detecta cambios urbanos de una manera precisa y fiable gracias a la elevada precisión en el emparejamiento de las imágenes comparadas. El sistema ha sido probado con imágenes pancromáticas del satélite IRS (5.8m./píxel) del término municipal de Málaga. La imagen de cambios obtenida, además de posibilitar la monitorización periódica de la evolución de un área urbana, ha sido integrada en un sistema de información geográfica (SIG) del ayuntamiento de Málaga, ayudando en la gestión de obras y control urbanístico.

Agradecimientos

Queremos agradecer la inestimable ayuda y colaboración en el desarrollo de este trabajo del “Centro Municipal de Informática (CEMI)” del Ayuntamiento de Málaga.

Referencias

- [1] Brown, L. G. (1992). "A Survey of Image Registration Techniques". ACM Computing Surveys. Vol. 24 No. 4.
- [2] Campbell, J. B. (1996). "Introduction to Remote Sensing". Taylor&Francis.
- [3] Chuvieco, E. (2000). "Fundamentos de Teledetección Espacial". Rialp.
- [4] González, J. (1999). "Visión por Computador". ITP Paraninfo.
- [5] Itten, K. I. y P. Meyer (1993). "Geometric and radiometric correction of TD Data of mountainous forested areas". IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing.
- [6] Jessen, J. R. (1999). "Remote sensing of the environment an earth resource perspective". Prentice Hall.
- [7] Kasischke, E. S. (1993). "Monitoring of Wildfires in boreal forests using large area AVHRR-NDVI composite image data". Remote sensing of environments, 45. pp. 61-71.
- [8] Lucas, B. D. y T. Kanade (1981). "An iterative image registration technique with an application to stereo vision". Int. Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.674-679.
- [9] Lunetta, R. S. y C. D. Elvidge (editors) (1999) "Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications". Ann Arbor Press Inc.
- [10] Tomasi, C. y T. Kanade (1991). "Detection and tracking of point features". Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132, 1991.