

Análisis de cambios de usos del suelo en la «Vega de Granada»: correcciones radiométricas y evaluación del cambio

Land-cover change analysis in «Vega de Granada»: radiometric corrections and change assessment

V. F. Rodríguez-Galiano¹, M. J. García-Soldado¹, M. Chica-Olmo¹,
E. Pardo-Igúzquiza¹, J. P. Rigol-Sánchez² y M. Chica-Rivas³
vrgaliano@ugr.es

¹ *Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.
Avda. Fuentenueva, s/n. 18071 Granada*

² *Departamento de Geología. Universidad de Jaén. Campus de las Lagunillas, s/n. B-3,
23071 Jaén*

³ *Departamento de Análisis Matemático. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.
Avda. Fuentenueva, s/n. 18071 Granada*

Recibido el 22 de febrero de 2010, aceptado el 17 de mayo de 2010

RESUMEN

En este trabajo se evalúan diferentes metodologías de estudio de cambios en los usos del suelo y de corrección radiométrica de series temporales de imágenes Landsat TM. Se ha aplicado un método híbrido de corrección absoluta denominado «normalización absoluta», basado en el código de transferencia radiativa MODTRAN4 y se han comparado diversas técnicas de normalización radiométrica («pseudoinvariant features» y «radiometric control sets»). Por otro lado, los resultados de las técnicas de «realce de cambios» y «post-clasificación» aplicadas en este estudio cuantifican y aportan información sobre la naturaleza de los cambios en el área metropolitana de Granada y demuestran el potencial de las imágenes Landsat para cartografiar los cambios en los usos del suelo.

PALABRAS CLAVE: teledetección, usos del suelo, correcciones radiométricas, normalización absoluta, análisis de cambios.

ABSTRACT

In this paper several approaches to study the land-use/land-cover changes and radiometric correction methodologies of Landsat satellite images have been assessed. Absolute normalization has been applied, which is based on the relative correction between a subject image and a reference image that has been corrected using the radiative transfer code MODTRAN4. In addition, «Pseudo-invariant features» and «radiometric control sets», two different radiometric normalization techniques have also been compared. Overall, the results of «change enhancement» and «post-classification» techniques quantify and yield information about the nature of change in the Granada metropolitan area.

KEY WORDS: remote sensing, land-uses, radiometric corrections, absolute normalization, change analysis.

INTRODUCCIÓN

Es un hecho constatable que a lo largo de las últimas décadas se ha producido una importante transformación de las áreas rurales y litorales de España, y muy especialmente de Andalucía. Este proceso de transformación, que afecta esencialmente al uso del suelo, es aún más notorio en las áreas periurbanas, en las que el proceso de expansión urbana ejerce una gran presión sobre los usos del suelo tradicionales. La teledetección espacial constituye una técnica con un potencial inestimable para el estudio de procesos ecológicos y socio-económicos, en los que la componente espacial y temporal de la «información geográfica» reviste especial importancia. En este contexto de estudio de los procesos de transformación territorial, las técnicas de monitorización basadas en datos multispectrales han demostrado un gran potencial para detectar, identificar y cartografiar cambios en los usos del suelo a partir del procesamiento y la clasificación de imágenes digitales provenientes de sensores satelitales como Landsat (TM y ETM+).

Las técnicas de detección de cambios aplicadas a imágenes de satélite pueden agruparse en dos categorías: técnicas post-clasificación y técnicas de realce de cambios, dependiendo de si en el análisis se utilizan imágenes categorizadas o continuas (Singh, 1989; Coppin y Bauer, 1996; Cihlar, 2000; Lu *et al.*, 2006).

La premisa básica en la utilización de datos de satélite para la detección de los cambios, es que los cambios en los usos del suelo implican cambios en los valores de radiancia. Aunque existen otros factores que pueden cambiar la energía electromagnética detectada por el sensor, que no están asociados con un cambio del paisaje, sino con variaciones en las condiciones atmosféricas, en el ángulo solar y diferencias en la humedad del suelo (Singh, 1989). Es por ello que se requiere el empleo de metodologías de corrección radiométrica robustas, que transformen las imágenes de satélite en unidades comparables.

La idoneidad de aplicar una determinada metodología de corrección depende de una serie de factores, tales como: las imágenes, los datos atmosféricos disponibles, el objetivo planteado, y los métodos analíticos usados para extraer la información. En algunas aplicaciones relaciona-

das con clasificaciones y detección de cambios las correcciones atmosféricas son innecesarias, siempre y cuando los datos de entrenamiento y los datos a clasificar estén en la misma escala relativa. En otras circunstancias, las correcciones son necesarias para convertir datos multitemporales a la misma escala radiométrica para el estudio de una determinada cobertura a lo largo del tiempo (Song *et al.*, 2001).

FUNDAMENTOS

Correcciones radiométricas

Las correcciones atmosféricas pueden ser absolutas (CA), cuando un nivel digital (ND) es convertido a reflectancia de superficie, o relativas (CR), en las que partiendo de un par de imágenes se considera una relación lineal y se minimizan las diferencias radiométricas existentes.

Correcciones absolutas (CA)

Convierten la radiancia registrada por el sensor a valores independientes de las condiciones atmosféricas, permitiendo comparar imágenes de diferentes fechas o directamente píxeles con medidas de campo y de laboratorio.

Los procedimientos de corrección absoluta varían en la cantidad y exactitud de los datos atmosféricos requeridos para la aplicación, y a excepción del método de sustracción del objeto oscuro (Chávez, 1996), pocos se pueden aplicar cuando no hay datos atmosféricos disponibles (Furby y Campbell, 2001). Dependiendo de la metodología a aplicar se hace necesario disponer de la siguiente información: calibración radiométrica del sensor, medidas simultáneas *in situ* de parámetros atmosféricos, medidas de reflectancia de superficie, códigos de transferencia radiativa (RTC), atmósferas simuladas y modelos de aerosoles.

Correcciones Relativas (CR)

Este tipo de técnicas no necesitan medidas de campo simultáneas y suponen la normalización de las intensidades de los niveles digitales ban-

da a banda a una imagen de referencia seleccionada; así, las imágenes son tratadas como si hubiesen sido adquiridas en condiciones atmosféricas y de iluminación similares (Yang y Lo, 2000). Entre ellas se encuentran las técnicas de regresión lineal, que consideran que la radiancia medida por un sensor para una determinada banda espectral es función lineal de la reflectividad (Schott *et al.*, 1988; Casselles y García, 1989; Paolini *et al.*, 2006):

$$ND'_k = m_k ND_k + b_k$$

donde ND es el nivel digital de una banda, ND' es el nivel digital normalizado, m es la pendiente o ganancia, b es el sesgo y k representa cada una de las bandas del sensor. Los coeficientes m_k y b_k son calculados mediante las siguientes ecuaciones (Yang y Lo, 2000):

$$m_k = \frac{V_{R_k S_k}}{V_{S_k S_k}}$$

$$b_k = R_k - m_k * S_k$$

R_k y S_k son las medias de la imagen de referencia y la imagen sujeto de la corrección y $V_{R_k S_k}$ y $V_{S_k S_k}$ la covarianza y la varianza de la imagen sujeto.

Métodos de detección y análisis de cambios

La detección de cambios es un proceso de identificación de los diferentes estados de un objeto o fenómeno observado en diferentes instantes temporales (Singh, 1989). Esencialmente, permite cuantificar los efectos en el tiempo utilizando grupos de datos multitemporales.

Todas las técnicas de detección de cambios se fundamentan en dos métodos básicos, el análisis comparativo de clasificaciones independientes producidas para diferentes fechas y el análisis simultáneo de datos multitemporales, dependiendo de si el análisis utiliza imágenes continuas o categorizadas. En el primer caso se comparan imágenes previamente clasificadas mediante matrices de confusión; en el segundo, se emplean técnicas cuantitativas: diferencias, regresión, cocientes, componentes principales, vectores multitemporales, etc. (Collins y Woodcock, 1996; Macleod y Congalton, 1998; Oetter,

et al., 2001; Chica-Olmo, *et al.*, 2004; Yuan *et al.*, 2005; Lunetta *et al.*, 2006).

Técnicas post-clasificación

Estas técnicas comparan mapas obtenidos mediante procesos de clasificación supervisados o no. La exactitud del resultado obtenido depende de la exactitud de las clasificaciones originales, por lo que el mapa de cambios será tan exacto como lo sean las clasificaciones. Su principal ventaja es que son capaces de producir información descriptiva del tipo de cambio y no requieren que las imágenes sean normalizadas. La mayor desventaja de estas técnicas es el tiempo empleado en clasificar las imágenes y el hecho de que algunos errores producidos en la clasificación pasen a formar parte del mapa de cambios.

Técnicas de realce de cambios

Las técnicas de realce de cambios suponen una combinación matemática de imágenes de diferentes fechas. Estas técnicas tienen la ventaja de ser más exactas identificando áreas de cambio. Por otra parte, requieren a menudo un análisis adicional para caracterizar la naturaleza del cambio y una mayor exactitud para la normalización y el co-registrado.

METODOLOGÍA

Área de estudio y datos

Para este estudio se han usado dos escenas flotantes Landsat Thematic Mapper 5 de la misma área del Sureste de España. Las imágenes fueron adquiridas el 17 de julio de 1998 y el 1 de julio de 2004 respectivamente. La localización de las escenas corresponde con el path 200 row 34 del Landsat Worldwide Referent System (WRS).

Para las correcciones radiométricas se han considerado las escenas Landsat completas. La detección y análisis de cambios ha sido aplicada a un área piloto, la «Vega de Granada». La Vega de Granada está situada al sur de la Península Ibérica, dentro de la provincia de Granada, al oeste y sur de la ciudad de Granada (Fig. 1).

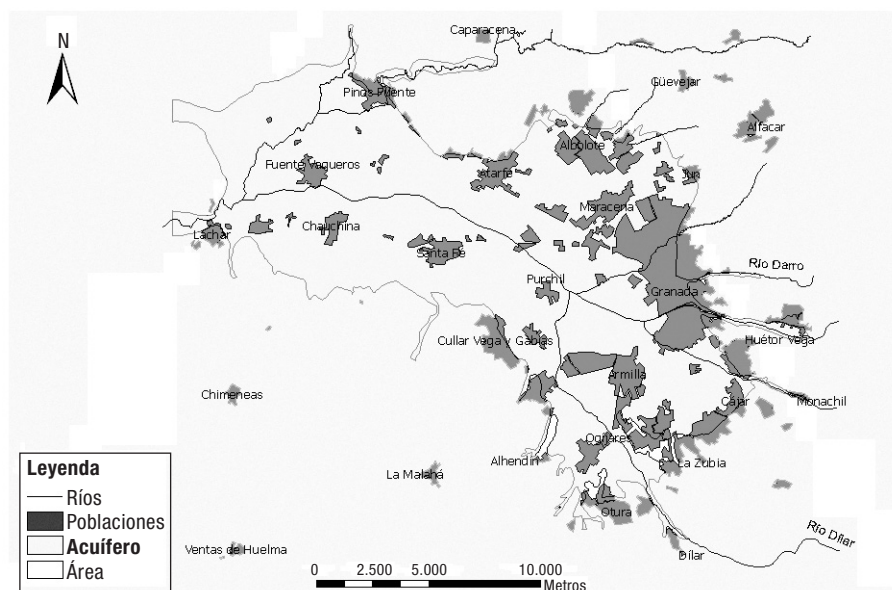


Figura 1. Localización geográfica de la Vega de Granada.

Morfológicamente, la Vega de Granada coincide con un acuífero detrítico de gran importancia regional, que ocupa una superficie esencialmente plana de unos 200 km² (García-Soldado, 2009). Este área está caracterizada por la presencia de cultivos diversos, que van desde el olivar en secano, a los regadíos de los márgenes del río Genil. El principal uso del suelo es el agrícola, que compite fuertemente en determinadas áreas con usos urbanos, especialmente, en las zonas cercanas al área metropolitana de Granada.

Debido a la naturaleza retrospectiva de este estudio ha sido necesario recurrir a información auxiliar para crear las bases de datos para el entrenamiento y validación del cambio. En la selección de las áreas de entrenamiento se han utilizado, además de las imágenes Landsat, las ortofotografías digitales de Andalucía del año 1998 y 2004, a escala 1:10.000 editadas por la Junta de Andalucía y los Mapas de Usos del Suelo y Coberturas Vegetales del Suelo de Andalucía de los años 1999 y 2003 editados por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

Correcciones radiométricas

Las correcciones atmosféricas son necesarias en situaciones en las que debido a la metodolo-

gía de detección de cambios a aplicar la atmósfera no tiene un efecto aditivo sobre los datos de partida. En este estudio se ha usado el índice de vegetación normalizado (NDVI), el cual considerando los efectos atmosféricos se define como:

$$\frac{(\rho_{IRC} - \rho_R) - (A_{IRC} - A_R)}{(\rho_{IRC} + \rho_R) - (A_{IRC} + A_R)}$$

donde ρ y A son respectivamente los valores de reflectividad y los efectos atmosféricos para las bandas del infrarrojo cercano y del rojo. De la ecuación anterior se deduce que, en el caso de los índices de vegetación, la relación con el efecto atmosférico no es lineal, por lo que es importante corregir radiométricamente los niveles digitales antes del cálculo de los índices (Song *et al.*, 2001).

Para este estudio se ha elegido un método de normalización absoluta (Schroeder *et al.*, 2006), en el cual se corrige una imagen a reflectividad de superficie y el resto de imágenes se ajustan a ella mediante técnicas de CR. La elección de esta metodología de corrección ha estado determinada por la ausencia de datos correspondientes a los parámetros atmosféricos necesarios para la corrección absoluta de la imagen de 1998 (ver Tabla 1), por lo que la imagen elegida como base para la normalización absoluta ha sido la escena de julio de 2004.

Hora	Vapor (g/cm ²)	α_1	α_2	AOD 670 nm	AOD 440 nm
10:13	1,747	1,245	0,935	0,163	0,269
10:18	1,713	1,284	0,941	0,150	0,251
10:25	1,731	1,335	0,921	0,135	0,225
10:33	1,709	1,352	0,883	0,140	0,228
10:41	1,650	1,421	0,895	0,129	0,210
10:48	1,675	1,452	0,969	0,130	0,219

Tabla 1. Datos atmosféricos de Granada (1-7-2004). Fotómetro solar CIMEL CE-318.

Se ha utilizado el programa de corrección atmosférica FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) desarrollado por el Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate (AFRL/VS), Hanscom AFB and Spectral Sciences, Inc. (SSI), el cual está basado en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN4 (MODERate Resolution TRANsmittance). Los objetivos principales de este modelo son, en primer lugar, eliminar de la radiancia recibida por el sensor los efectos de la absorción y dispersión causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión y, en segundo lugar, convertir esa radiancia a valores de reflectividad de superficie. La radiancia espectral L^* en un píxel del sensor es definida por medio de los parámetros siguientes (Abreu y Anderson, 1996):

$$L^* = \left(\frac{A\rho}{1-\rho_e} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a^*$$

donde ρ es la reflectividad de superficie en el píxel, ρ_e es un promedio de la reflectividad de superficie en una región circundante al píxel, S es el albedo esférico de la atmósfera, L_a^* es la radiancia aportada por la dispersión atmosférica que no ha alcanzado la superficie y A y B son coeficientes independientes de la superficie que varían con las condiciones atmosféricas y geométricas.

Los valores de A , B , S y L_a^* son determinados por MODTRAN4, el cual requiere para sus cálculos diversos parámetros de entrada: ángulo solar, ángulo de observación, elevación promedio de la superficie, modelo atmosférico estándar, tipo de aerosol y el rango de visibilidad horizontal. Después de obtener las variables atmosféricas se despeja de la ecuación anterior-

mente descrita las reflectividades de superficie de cada píxel, en todos los canales del sensor.

El proceso de corrección fue realizado considerando algunos parámetros especificados en la cabecera de la imagen Landsat: hora de adquisición, elevación solar y los coeficientes de calibración; el resto fueron calculados a partir de medidas *in situ* realizadas con un fotómetro solar CIMEL CE-318, simultáneas a la adquisición de la imagen.

El modelo de atmósfera seleccionado fue el estándar de verano para latitudes medias, el cual considera un contenido en vapor de agua atmosférico de 2,92 g/cm², por lo que se introdujo un factor de corrección para ajustar el contenido en vapor de agua por defecto al de las condiciones de adquisición de la imagen (Tabla 1).

En la elección del modelo de aerosoles se partió de las medidas de α_1 y α_2 (coeficientes de Angström; Tabla 1), las cuales determinaron el uso de un modelo de aerosoles rural. El último parámetro introducido en el modelo fue la visibilidad (V), definida para longitudes de onda de 550 nm, relacionada con el coeficiente de extinción β mediante la siguiente ecuación (Abreu y Anderson, 1996):

$$V = \frac{3,912}{\beta}$$

donde V es igual a la visibilidad y β es el coeficiente de extinción, definido como el espesor óptico para 550 nm por km. Para obtener este coeficiente se ha dividido por la anchura de la capa efectiva de aerosoles.

Una vez corregida la imagen de 2004 a unidades de reflectividad de superficie, la imagen del 17 de julio de 1998 fue normalizada a la anterior. En la CR se han comparado dos metodologías diferentes: «Pseudoinvariant Features» y «Radiometric Control Sets» (Yang y Lo, 2000).

La metodología Pseudoinvariant features (características pseudoinvariantes, PIF), fue desarrollada por Shott *et al.* (1988). Se basa en la búsqueda de objetos con una reflectividad casi constante en las diferentes escenas (pseudoinvariantes). De acuerdo con Shott *et al.* (1988), son típicamente objetos cuya reflectancia es independiente de los ciclos estacionales o biológicos y por tanto se asume que las diferencias

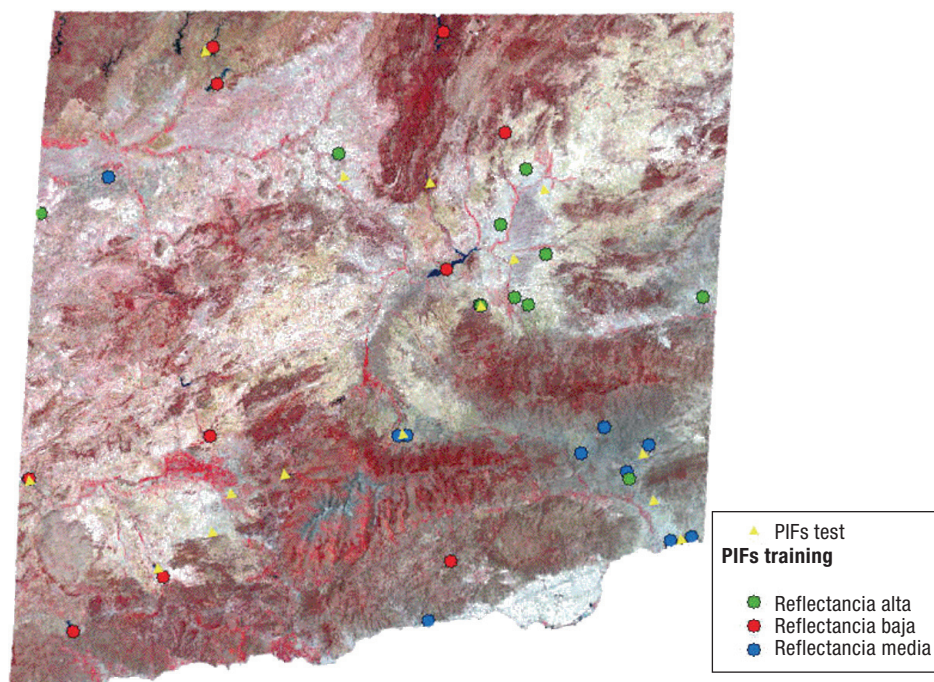


Figura 2. Localización de las PIFs usadas para el entrenamiento y la validación de la normalización.

en el brillo de estos objetos son una función lineal.

Radiometric control set (RCS), fue desarrollado por Hall *et al.* (1991). Este método se fundamenta en que en una imagen siempre existen algunos píxeles que tienen la misma reflectancia media, que se mantienen a lo largo de imágenes de la misma escena para distintas fechas. A este conjunto de píxeles es a lo que se le denomina «radiometric control set». Este método usa los extremos de la transformación de Kauth-Thomas verdor y brillo, que son construidos usando las dos primeras bandas de la transformación Tasseled Cap. El diagrama de dispersión de la transformación Kauth-Thomas aísla un conjunto de píxeles oscuros que corresponden a aguas profundas (embalses) y los píxeles brillantes representan elementos similares a los definidos por las características pseudoinvariantes (Franklin y Giles, 1995).

En la búsqueda de las características pseudoinvariantes se consideraron los criterios sugeridos en Eckhardt *et al.* (1990), y se seleccionaron diferentes áreas agrupadas en tres categorías que cubrían todo el rango de valores espectrales de brillo (Furby and Campbell, 2001):

- Píxeles de baja reflectividad: embalses.
- Píxeles de reflectividad media: afloramientos rocosos y áreas urbanas.
- Píxeles de alta reflectividad: arena de playa, suelos desnudos y canteras.

De la consideración de estos criterios resultaron un total de 30 PIFs de entrenamiento para la normalización y 15 áreas test para validar las correcciones. Cada área pseudoinvariante está formada por 4 ó 9 píxeles localizados sobre un área uniforme con el mismo nivel de elevación (Furby y Campbell, 2001). Los coeficientes obtenidos de las regresiones fueron aplicados banda a banda para obtener las imágenes normalizadas (Fig. 2 y Tabla 2).

	m	b	R
Banda 1	21,64	-1.365,64	0,997
Banda 2	40,14	-885,04	0,997
Banda 3	30,47	-496,29	0,998
Banda 4	37,26	-410,93	0,999
Banda 5	22,70	-186,22	0,999
Banda 6	1,75	-952,63	0,977

Tabla 2. Coeficientes de regresión obtenidos del método PIF para cada banda de imagen.

Como alternativa más operativa y menos subjetiva a la metodología de características pseudoinvariantes se utilizó el método «Radiometric Control Sets». Para ello se obtuvieron a partir de los extremos brillantes y oscuros del diagrama de dispersión de las bandas de verdor y brillo de la transformación Tasseled Cap un conjunto de píxeles de forma iterativa, cuya reflectancia media fue utilizada para realizar la normalización.

Las ecuaciones utilizadas para la obtención de los «radiometric control sets» fueron:

$$D_k = \{(Verdor \leq u_1) \cap (Brillo \leq u_2)\}$$

$$B_k = \{(Verdor \leq u_1) \cap (u_2 \leq Brillo)\}$$

donde D_k y B_k son el conjunto de píxeles oscuros y brillantes y u_1 y u_2 los valores umbrales para la obtención de estos conjuntos. Teóricamente, el conjunto de píxeles oscuros corresponden a zonas de agua profunda y el conjunto de píxeles brillantes a elementos similares a los de alta reflectividad definidos mediante las PIFs.

Los coeficientes de transformación (Tabla 3) fueron calculados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$m_k = \frac{(B_{Rk} - D_{Rk})}{(B_{Sk} - D_{Sk})}$$

$$b_k = \frac{(D_{Rk} B_{Sk} - D_{Sk} B_{Rk})}{(B_{Sk} - D_{Sk})}$$

Métodos de detección y análisis de cambios

En este trabajo se han comparado diferentes técnicas de realce de cambio (diferencia de NDVI, cocientes de NDVI y regresión) y de post-

clasificación. Con las técnicas de realce se ha obtenido información sobre la localización y la magnitud del cambio que ha sido complementada con información sobre su naturaleza mediante el cálculo de las matrices de confusión y de cambios, a partir de las imágenes clasificadas.

En las técnicas de detección de cambios se han distinguido entre una serie de umbrales basados en la desviación estándar para diferenciar las diferencias debidas a cambios reales de las que pueden atribuirse a una variación aleatoria (Fung y LeDrew, 1988).

$$u_1 : \begin{cases} x \geq \bar{x} + \sigma \\ x \leq \bar{x} - \sigma \end{cases}$$

$$u_2 : \begin{cases} x \geq \bar{x} + 2\sigma \\ x \leq \bar{x} - 2\sigma \end{cases}$$

$$u_3 : \begin{cases} x \geq \bar{x} + 3\sigma \\ x \leq \bar{x} - 3\sigma \end{cases}$$

Los valores umbrales mostrados en la Tabla 4 establecen unos límites que aplicados al histograma experimental de la imagen residual permiten separar las zonas de cambio de las que no han cambiado en el período de 1998 a 2004. De esta forma, se obtuvieron nueve mapas binarios que representan las zonas de cambio y no cambio por cada una de las técnicas y umbrales aplicados.

En cuanto al análisis de cambios postclasificación, teniendo en cuenta las características del área de estudio se definieron un conjunto de áreas de entrenamiento, que representan las diferentes clases identificables en el área de estudio a partir de las imágenes Landsat: choperas, bosque, matorral, olivar, regadío, suelo desnudo, suelo urbano y embalses.

En la clasificación de las imágenes se utilizó un algoritmo de clasificación de máxima probabilidad, que fue entrenado con 20 áreas de entre-

	B_{Rk}	D_{Rk}	B_{Sk}	D_{Sk}	M_k	b_k
Banda 1	1.748,367	221,853	158,813	76,337	18,509	-1.191,045
Banda 2	2.157,551	317,018	86,865	26,959	30,724	-511,261
Banda 3	2.513,882	135,958	111,231	18,780	25,721	-347,071
Banda 4	2.507,279	-64,032	96,341	9,728	29,687	-352,829
Banda 5	2.905,336	-13,004	148,918	6,811	20,536	-152,879
Banda 7	-811,458	-945,241	86,393	4,314	1,630	-952,273

Tabla 3. Valores medios de los RCS y coeficientes de regresión.

Diferencia NVI			Ratio NDVI			Regresión NDVI		
U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃	U ₁	U ₂	U ₃
-0,159	-0,308	-0,458	-0,441	-0,927	-1,413	-0,441	-0,927	-1,413
0,140	0,289	0,438	0,531	1,018	1,504	0,531	1,018	1,504

Tabla 4. Valores umbrales aplicados en las técnicas de realce de cambios.

namiento por clase, con un número de píxel que varió entre 9 y 12 (180 a 240 píxeles por clase), y por tanto suficiente para calcular las matrices de varianza y covarianza por el clasificador. Para la evaluación de la exactitud de las clasificaciones se utilizaron un total de 145 píxeles por clase, independientes de las áreas de entrenamiento.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La forma ideal de evaluar la exactitud de una corrección atmosférica es comparar medidas *in situ* de propiedades atmosféricas y de reflectancia de superficie en el tiempo de adquisición de las imágenes con la estimación de los parámetros resultantes de la corrección atmosférica (Moran *et al.*, 1992). Por desgracia, en estudios multitemporales en los que se utilizan imágenes de archivo esto no es siempre posible, por lo que hay que recurrir a otras formas de validación. En este estudio, se utilizó el error cuadrático medio (RMS) para medir la bondad de las diferentes técnicas de normalización aplicadas.

El error cuadrático medio se calculó a partir de un conjunto de 15 muestras de reflectividad

	RMS (PIF)	RMS (RCS)
Banda 1	0,502	0,425
Banda 2	0,457	0,667
Banda 3	0,362	0,505
Banda 4	0,590	1,035
Banda 5	0,518	0,679
Banda 7	0,023	0,029

Tabla 5. Error cuadrático medio de los métodos PIF y RCS.

constante, que no se habían usado en el cálculo de los coeficientes de calibración, comparando las intensidades de estos objetivos de referencia con las de las imágenes calibradas.

La Tabla 5 muestra los errores cuadráticos medios calculados para cada método de normalización en cada banda. Ambos métodos tienen el mayor error en el infrarrojo cercano (banda 4), lo cual puede ser debido a diferencias en la presencia de vegetación entre las imágenes. El método PIF, con excepción de la banda 1, presenta un error cuadrático medio inferior al RCS, por lo que fue el elegido para normalizar las imágenes utilizadas en el estudio de los cambios de usos del suelo.

Se ha de indicar, no obstante, que estos métodos de normalización absoluta son aproximados, pues admiten la linealidad de las correcciones y consideran las condiciones atmosféricas como constantes en toda el área de estudio.

Con carácter general, se puede concluir que, los resultados de los métodos de detección de cambio aplicados son similares. Los métodos de diferencia, cociente y regresión de imágenes han sido capaces de diferenciar las áreas de cambio a partir de los índices de vegetación normalizados (NDVI), con índices de exactitud global del 88,67%, 81,33% y 80,67%, e índices Kappa del 0,72, 0,56 y 0,50 respectivamente. La diferencia de imágenes y el cociente produjeron una estimación similar de las áreas de cambio, con estimaciones de cambio iguales a 1.686 y 1.697 km² respectivamente (ver Tabla 6).

	Diferencia	Cociente	Regresión
E. global	88,67	81,33	80,67
Kappa	0,72	0,56	0,50
Cambio (km ²)	24	13	66

Tabla 6. Evaluación de la exactitud y superficie de cambio de las técnicas de realce de cambios.

La clasificación supervisada de las imágenes Landsat normalizadas correspondientes a la Vega de Granada para los años 1998 y 2004 dio como resultado unos mapas clasificados con una exactitud aceptable, con índices kappa iguales a 0,86

y 0,92 respectivamente. La exactitud del mapa de cambios final es igual al producto de las exactitudes individuales de cada mapa clasificado (Yuan *et al.*, 2005), por lo que se obtuvo finalmente un mapa de cambios con un kappa igual a 0,79.

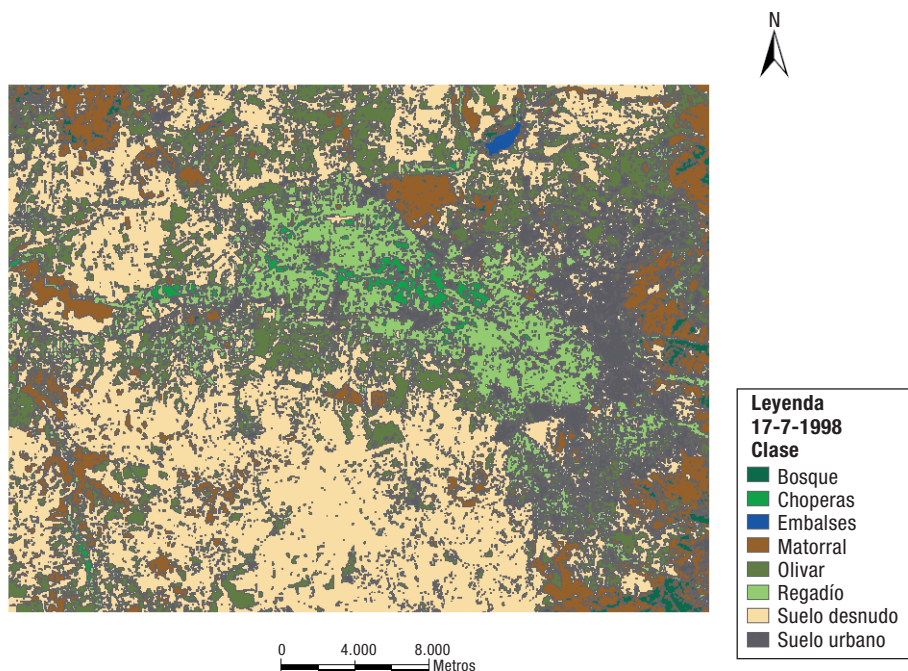


Figura 3. Mapa clasificado de la Vega de Granada para el verano de 1998.

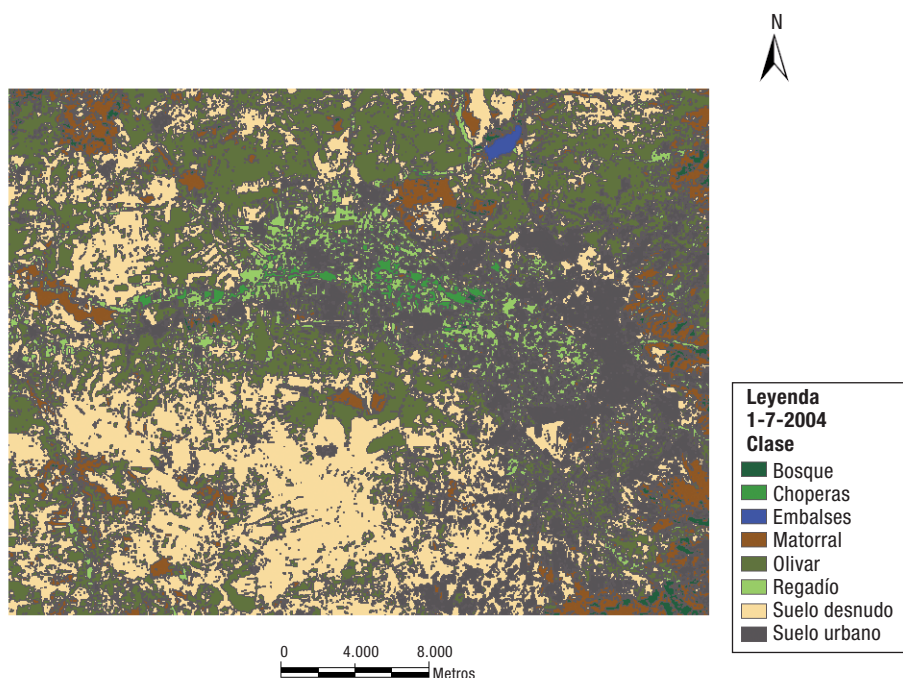


Figura 4. Mapa clasificado de la Vega de Granada para el verano de 2004.

Clasificación 2004	Clasificación 1998								
	Choperas	Bosque	Embalses	Matorral	Olivar	Regadíos	s. des.	Urbano	Total
Choperas	376,38	38,16	0	24,84	45,27	603,27	20,43	23,94	1.132,29
Bosque	56,79	3.354,84	0,27	785,52	28,35	68,04	11,34	4,05	4.309,2
Embalses	0	0,36	143,64	5,22	0,45	4,68	2,34	0	156,69
Matorral	40,14	1.392,84	3,42	17.420,22	963,27	538,65	1.076,67	189,9	21.625,11
Olivar	138,69	124,11	0	4.529,43	29.505,6	4.064,94	21.077,55	1.603,62	61.043,94
Regadíos	554,4	161,37	1,26	785,79	1.905,12	5.605,65	1.144,35	401,49	10.559,43
s. des.	49,86	14,94	2,7	5.450,58	5.270,76	1.978,2	37.764,45	1.163,61	51.695,1
Urbano	129,6	27,63	0,36	1.461,24	2.391,12	3.540,96	6.036,57	6.890,76	20.478,24
Total	1.345,86	5.114,25	151,65	30.462,84	40.109,94	16.404,39	67.133,7	10.277,37	171.000

Tabla 7. Matriz de cambio entre las clasificaciones de 1998 y 2004 en hectáreas.

Del mapa de cambios puede deducirse la evolución o transiciones de las diferentes categorías en el período de 1998 a 2004 (Tabla 7). La clase urbana pasó de 10.277 ha (6.01%) a 20.478 (11,98%) fundamentalmente en detrimento de la clase regadíos, suelo desnudo (s. des.) y matorral. Este incremento tan acentuado pudo ser debido a una sobreestimación de la clase urbana en la clasificación de la imagen de 2004 debido a una confusión con la clase suelo desnudo. El olivar incrementó su extensión en un 12,24% respecto al total del área de estudio, ocupando 61.044 ha en 2004. Este incremento, como puede observarse en la Tabla 7, se debió fundamentalmente a una transición desde la clase suelo desnudo, la cual probablemente no fue bien clasificada en la imagen de 1998 por encontrarse el olivar en un estado de desarrollo incipiente.

En futuros trabajos se pretende mejorar el resultado de las clasificaciones mediante el uso de clasificadores no paramétricos y la inclusión de variables auxiliares a estos modelos de clasificación: como imágenes multiestacionales, térmicas, modelos digitales del terreno y variables texturales y de contexto.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado con la financiación del Proyecto GEOSDA CGL2010-17629

del Ministerio de Ciencia e Innovación y del grupo de investigación RNM122 de la Junta de Andalucía.

BIBLIOGRAFÍA

- ABREU, L. & ANDERSON, G. P. 1996. The modtran 2/3 report and lowtran 7 model. Technical report, Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, PL/GPOS.
- CASSELLES, V. & GARCÍA, M. J. 1989. An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 1127-1134.
- CHAVEZ, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- CHICA-OLMO, M., RUIZ-CASTELLANO, J. P. & RIGOL-SÁNCHEZ, J. P. 2004. Aplicación de la función variograma al análisis de cambios espacio-temporales en imágenes Landsat TM. *Revista de Teledetección*, 22: 41-46.
- COLLINS, J. B. & WOODCOCK, C. E. 1996. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multi-temporal landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 56: 66-77.
- COPPIN, P. R. & BAUER, M. E. 1996. Change detection in forest ecosystems with remote sensing digital imagery. *Remote Sensing Reviews*, 13: 207-234.
- ECKHARDT, D. W., VERDIN, J. P. & LYFORD, G. R. 1990. Automated update of an irrigated lands

- gis using spot hrv imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56: 1515-1522.
- FUNG, T. & LEDREW, E. 1988. The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1449-1454.
- FURBY, S. L. & CAMPBELL, N. 2001. Calibrating images from different dates to «likevalue» digital counts. *Remote Sensing of Environment*, 77: 186-196.
- GARCÍA-SOLDADO, M. J. 2009. Metodología basada en SIG para el desarrollo de un sistema soporte de decisión en la gestión de la calidad de los recursos hídricos subterráneos de la Vega de Granada. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada. 335 pp.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E. & MORAN, E. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 2365-2407.
- LUNETTA, R. S., KNIGHT, J. F., EDIRIWICKREMA, J., LYON, J. G. & WORTHY, L. D. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 105: 142-154.
- MACLEOD, R. D. & CONGALTON, R. G. 1998. A quantitative comparison of change detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64: 207-216.
- MORAN, M. S., JACKSON, R. D., SLATER, P. N. & TEILLET, P. M. 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41: 169-184.
- OETTER, D. R., COHEN, W. B., BERTERRETICHE, M., MAIERSPERGER, T. K. & KENNEDY, R. E. 2001. Land Cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 76: 139-155.
- PAOLINI, L., GRINGS, F., SOBRINO, J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. & KARSZENBAUM, H. 2006. Radiometric correction effects in Landsat multi-date/multi-sensor change detection studies. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 685-704.
- SCHOTT, J. R., SALVAGGIO, C. & VOLCHOK, W. J. 1988. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26: 1-14.
- SCHROEDER, T. A., COHEN, W. B., SONG, C., CANTY, M. J. & YANG, Z. 2006. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in Western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 10: 16-26.
- SINGH, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 989-1003.
- SONG, C., WOODCOCK, C. E., SETO, K. C., PAX LENNEY, M. & SCOTT, A. 2001. Classification and change detection using landsat tm data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75: 230-244.
- YANG, X. & LO, C. P. 2000. Relative radiometric normalization for change detection from multi-date satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66: 967-980.
- YUAN, F., SAWAYA, K. E., LOEFFELHOLZ, C. & BAUER, M. E. 2005. Land cover classification and change analysis of the twin cities (minnesota) metropolitan area by multitemporal landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98: 317-328.