

Evolución de la cubierta forestal de la cuenca del Duero: análisis multitemporal mediante teledetección

José Martínez Fernández^{a,b}, Nilda Sánchez Martín^{b,c,*} Laura Celaya Irigoyen^d

^a*Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca*

^b*CIALE, Centro Hispano Luso de Investigaciones Agrarias, Universidad de Salamanca*

^c*Departamento de Ingeniería Cartográfica, Universidad de Salamanca*

^d*STIG, Servicio Transfronterizo de Información Geográfica, Universidad de Salamanca*

Resumen

Se presenta un estudio de la evolución de la cubierta forestal en cuatro sub-cuencas de la cuenca del Duero mediante el uso de imágenes Landsat desde mediados de los años 70 hasta la actualidad. El estudio se basa en el análisis multitemporal en las cuencas del Esla, el Carrión, el Tormes y el Alto Duero, todas ellas representativas de las diferentes vertientes hidrográficas. A diferencia de lo que se observa en la mayoría de los estudios realizados sobre la evolución de la superficie de bosque, que utilizan como punto de partida la foto aérea de 1956 y que, como máximo, aportan mapas de la distribución de los usos/coberturas de suelo en dos o tres fechas durante la década de los 90 o en la actualidad, en este trabajo se han utilizado todas las imágenes disponibles (entre 10 y 13 por cuenca). De esta forma se consiguió una serie homogénea en el tiempo y con un número de mapas suficiente para realizar un análisis de tendencias y determinar de manera rigurosa la existencia o no de una evolución clara.

En una fase preliminar se empleó cartografía base del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos y del Mapa Forestal de España, mapas de los Inventarios Forestales Nacionales y ortofotos aéreas como datos auxiliares para definir las clases de cubierta, seleccionar las zonas de entrenamiento y validar los resultados. Para la caracterización espectral de las distintas clases se utilizaron para cada escena y fecha el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y las reflectividades de superficie de las bandas visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, tras los procesos de calibración y corrección geométrica, radiométrica y atmosférica. El método elegido para la discriminación de cubiertas boscosas ha sido el de

* *E-mail* : nilda@usal.es

clasificación supervisada por máxima probabilidad y el posterior refinado de resultados mediante filtrado y criterios condicionales. Finalmente, los resultados se evaluaron mediante matrices de confusión generadas a partir del Mapa Forestal de España (2002-2004), y también se compararon las superficies obtenidas por el proceso de clasificación con las de la cartografía base de los IFN y del programa CORINE.

Los resultados muestran que, a diferencia de lo que ha ocurrido en las principales zonas forestales de España, en la cuenca del Duero la superficie de bosque no ha aumentado en los últimos 40 años. Dicha cubierta muestra una tendencia claramente negativa en tres de las cuencas estudiadas.

Palabras clave: Landsat; clasificación; multitemporal; usos/coberturas de suelo; forestal

1. Introducción

Los avances en teledetección y el número de misiones espaciales y su duración están permitiendo en la actualidad la obtención de series de observación de la Tierra cada vez más largas y representativas. Este aspecto es de suma importancia cuando se trata de analizar la evolución de procesos que requieren de la escala y la perspectiva adecuadas. Los satélites Landsat han capturado en imágenes la superficie terrestre durante más de 40 años. Un registro tan amplio y consistente permite recuperar observaciones de periodos de los que se dispone de poca o nula información. La cartografía oficial de usos/coberturas de suelo disponible no es lo suficientemente homogénea (metodologías, escalas), ni se realiza con la suficiente periodicidad como para capturar los complejos cambios acaecidos. Se han publicado una gran cantidad de trabajos que utilizan fuentes de teledetección para determinar cambios de usos/coberturas de suelo. La mayoría de estudios arrancan hace pocas décadas, debido a la falta de información histórica, y usan sólo dos fechas (Skole et al., 1993; Lasanta et al., 2006; Pekkarinen et al., 2009; Vittek et al., 2014), tres (Mayaux et al., 2013; Boletta et al., 2006; Huang et al., 2009) o cuatro (Yuan et al., 2005). Para llevar a cabo un análisis riguroso se necesitan series temporales suficientemente largas de mapas homogéneos. Para el caso de mapas obtenidos por fuentes de teledetección, la principal referencia para saber dónde y cuándo ha sucedido un cambio en la cobertura del suelo la constituyen las imágenes Landsat (Cohen et al., 2010), que además son las que se remontan a fechas más antiguas. En relación con los cambios de uso de suelo en España en las últimas décadas, uno de los temas más recurrentes ha sido el de la evolución de la superficie forestal, y el hecho de contar con una serie larga de imágenes Landsat abre una nueva posibilidad para el estudio de dicha evolución. El objetivo de este trabajo ha sido analizar los cambios en la cubierta forestal de cuatro sub-cuencas representativas de la cuenca del Duero en los últimos cuarenta años. Para ello se ha llevado a cabo un análisis multitemporal mediante el uso de todas las imágenes Landsat disponibles, con el objeto de obtener una serie homogénea y lo suficientemente larga para poder llevar a cabo un análisis de tendencias. Entre los múltiples métodos de clasificación para obtener mapas de usos/coberturas de suelo se ha elegido el método supervisado por máxima probabilidad, el algoritmo paramétrico más usado por su solidez (Lu & Weng, 2007), que se ha aplicado a la serie multitemporal (DeFries et al., 1999) y refinado con métodos de postclasificación (Zhu & Woodcock, 2014).

2. Materiales y métodos

2.1. Zonas de estudio, datos imagen y tratamiento preliminar

El análisis de los cambios en la superficie forestal se ha realizado en las cuencas de los ríos Esla, Carrión, Tormes y Alto Duero (Fig. 1). Se trata de cuencas representativas de las vertientes, que suman más de 28000 km², es decir, el 36% de toda la superficie de la cuenca del Duero en su tramo español, y suponen una

aportación media en régimen natural de 7118 Hm³ anuales, más del 53% todo el agua circulante por el río Duero antes de su tramo internacional.

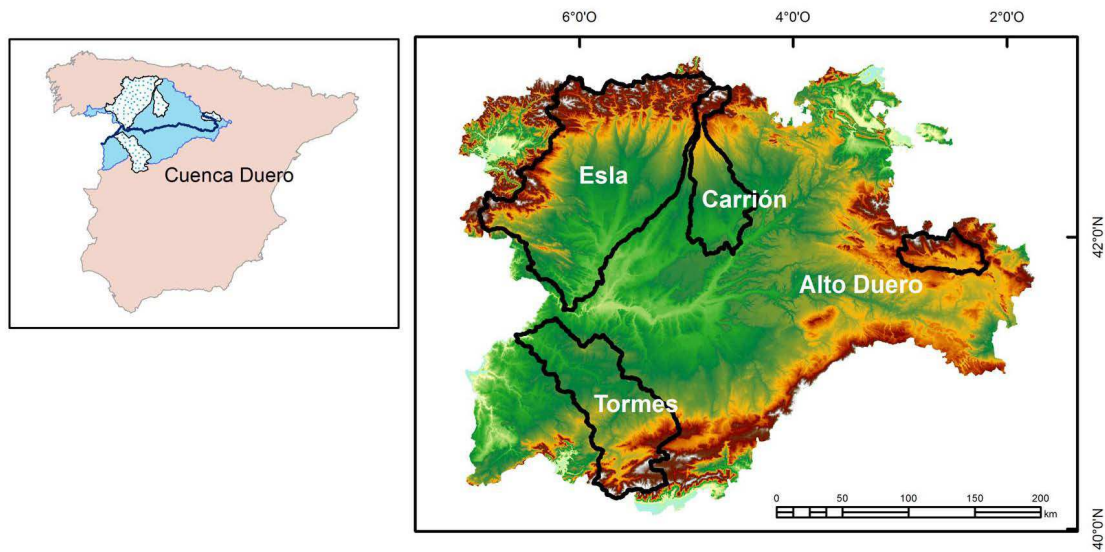


Fig. 1. Localización de las zonas de estudio dentro de la cuenca del Duero.

Se adquirieron 100 imágenes Landsat correspondientes a los sensores MSS (Landsat 1-3), TM (Landsat 4 y 5) y ETM+ (Landsat 7) desde la década de 1970 hasta la actualidad (Fig. 2). Las escenas seleccionadas, libres de nubes, comprenden un intervalo temporal desde finales de junio a finales de septiembre, coincidiendo con la fase de madurez del ciclo fenológico de la mayoría de las especies arbóreas.

Los niveles digitales originales se convirtieron a reflectividades en superficie a partir de los coeficientes del sensor y los parámetros de adquisición y tras la corrección por sustracción de objeto oscuro (Chavez, 1996), suficiente en clasificaciones multitemporales para la detección de cambios (Song *et al.*, 2001). La ortorrectificación se realizó mediante el modelo digital de elevaciones procedente de la Base Cartográfica Numérica 1:25000 (BCN25). Por último, se calculó el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para introducirlo como banda *input* en la clasificación.

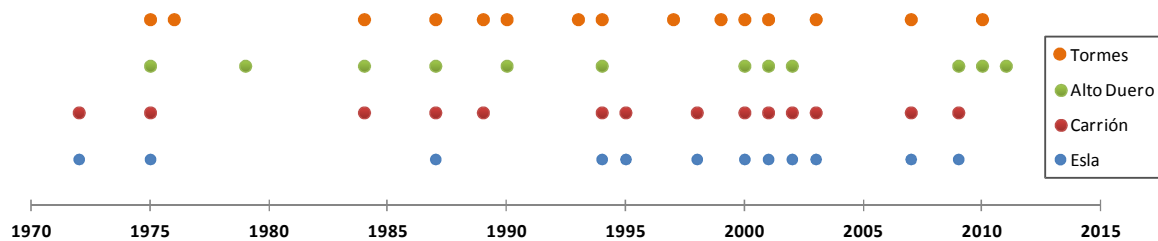


Fig. 2. Años de estudio para las cuatro cuencas.

2.2. Datos auxiliares y selección de leyenda

Los datos auxiliares empleados han sido los Mapas Forestales de España 1: 400.000 (MFE400) y 1: 50.000 (MFE50); el Mapa de cultivos y aprovechamientos 1: 50.000 (MCA50); ortofotos aéreas; y mapas de usos/coberturas de suelo de los proyectos CORINE (1990 y 2000). Estos datos permitieron definir y adaptar las categorías de la leyenda de los mapas de usos/coberturas de suelo a generar. También sirvieron para seleccionar las áreas de entrenamiento y validar los resultados.

La leyenda de usos/coberturas de suelo tiene seis categorías o clases finales:

- Bosques: áreas arboladas con una fracción de cabida cubierta (FCC) superior al 50%.
- Forestal no boscosa: zonas con arbolados dispersos (FCC < 50%), arbustados y matorrales.
- Vegetación herbácea: pastizales y prados.
- Zonas cultivadas
- Superficies artificiales y/o improductivas
- Superficies de agua

2.3. Métodos de clasificación y postclasificación

El algoritmo de clasificación empleado ha sido el de máxima probabilidad. Debido a los errores inherentes a todo proceso de clasificación (Castilla & Hay, 2006) puede resultar una variabilidad interanual espúrea que enmascare la variabilidad real, por lo que se han aplicado varios procesos de postclasificación para descartarlos, usando un método similar al de Zhu y Woodcock (2014). La primera fase del proceso consiste en utilizar un filtro de moda para eliminar píxeles aislados o irrelevantes y, posteriormente, se pasa a un proceso de depuración de los mapas resultantes. Se aíslan los píxeles que potencialmente han sufrido cambios, descartando los que han contabilizado 4 o más categorías distintas en el periodo de estudio (a los que se asigna la moda), y los restantes se comparan individualmente con los mapas del año anterior y posterior. Si un pixel en el mapa de un año determinado pertenece a una categoría, pero no lo hace ni en el año anterior ni en el posterior, se elimina de dicha categoría. Por el contrario, si un pixel no pertenece a una categoría en una fecha pero sí lo hace en el año anterior y en el posterior, se añade a dicha categoría.

2.4. Método de validación

Resulta imposible encontrar datos de referencia con los que se pueda valorar de forma rigurosa la exactitud de los mapas clasificados, pues no existen datos con una resolución temporal y espacial mejor que las imágenes Landsat durante ese periodo. Por ello, para validar los mapas se ha recurrido a dos estrategias. La primera consistió en comparar las categorías de los mapas resultantes con las categorías de un mapa de referencia, tomando el MFE50 del Tercer IFN. La segunda se basó en la comparación de superficies resultantes con las superficies proporcionadas por los Inventarios Forestales Nacionales (MCA50 y MFE50) y por los dos mapas CORINE.

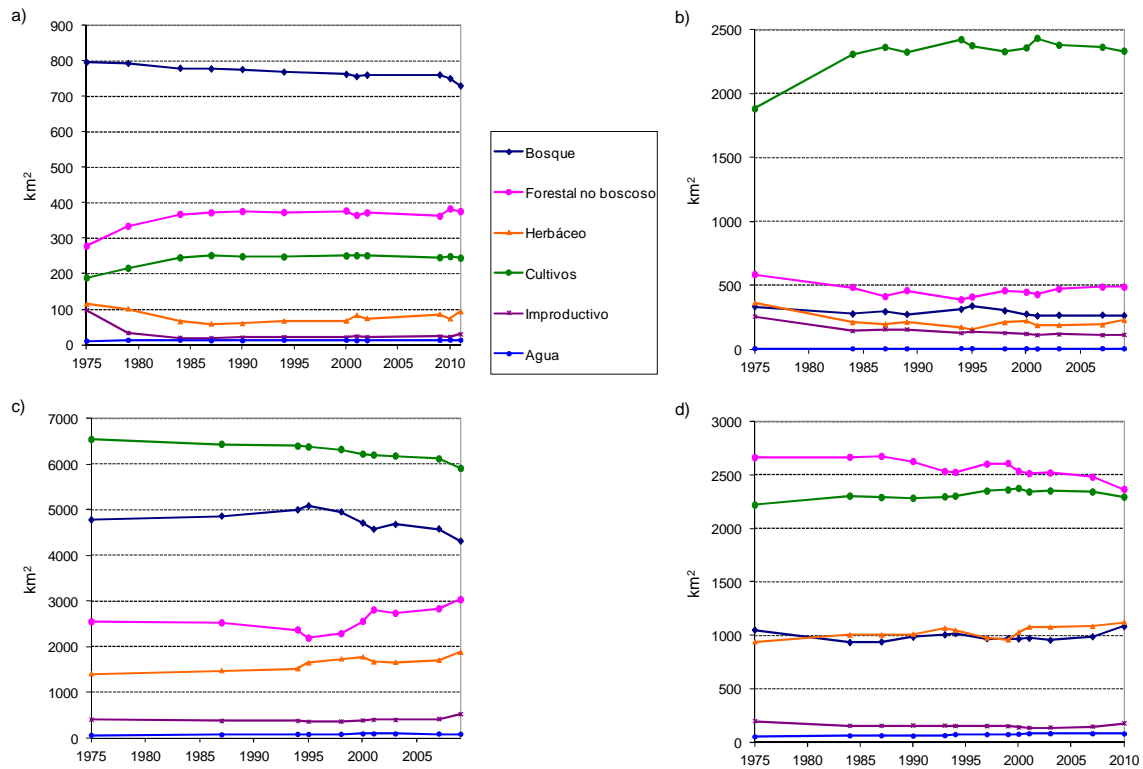


Fig. 3. Evolución de las superficies según tipo de cubierta en (a) Alto Duero (1975-2011), (b) Carrión (1975-2009), (c) Esla (1975-2009) y (d) Tormes (1975/1976-2010).

2.5. Análisis de tendencias

A partir de los datos de superficie de cada uso/coertura de suelo obtenidos en cada uno de los años estudiados se llevó a cabo un análisis de tendencias para determinar si las variaciones observadas obedecen a la existencia de una evolución clara en el tiempo, el sentido de tal evolución y su significación estadística. Para este análisis se utilizó el test estadístico de Mann-Kendall (MK), profusamente utilizado en la literatura científica para el estudio de tendencias temporales en variables de muy diversa índole (Hamed, 2009).

3. Resultados y discusión

3.1. Superficies resultantes

En la cuenca del Alto Duero la evolución de las superficies (Fig. 3a) indica que no ha habido cambios significativos en las superficies de las distintas cubiertas, aún con un ligero descenso en la superficie de bosque en el último período de estudio. En la cuenca del Carrión se aprecia que las superficies han permanecido prácticamente estables, aunque con un ligero incremento de las cultivadas (Fig. 3b). Para la cuenca del Esla tampoco se aprecian cambios reseñables, pese a que la superficie de bosque desciende a final

del periodo de estudio (Fig. 3c). Finalmente, la cuenca del Tormes no tiene apenas variaciones de superficie en las categorías (Fig. 3d).

El método de postclasificación consiguió reducir la variabilidad de las superficies obtenidas directamente de la clasificación, suavizando las fluctuaciones bruscas que se producían entre años consecutivos y que resultaba especialmente llamativa en la categoría bosque, cuya dinámica natural es muy lenta.

3.2. Validación de los mapas finales

Tomando como referencia el MFE50 se observa (Tabla 1) que los porcentajes de acierto más bajos correspondieron a la categoría herbáceo de vegetación natural, que puede confundirse con cultivos o forestal no boscoso. Sin embargo, los cultivos resultaron bien discriminados en las cuatro cuencas, debido a los marcados ciclos fenológicos de estas coberturas. La clase bosque fue bien diferenciada también en las cuatro cuencas, con porcentajes que oscilan entre el 67% y el 89%.

Tabla 1. Porcentajes de acierto de las clases de los mapas de las cuatro cuencas en comparación con el MFE50. Se indica en cada caso la fecha correspondiente a la confección del MFE50.

% acierto	Alto Duero (2004)	Carrión (2003)	Esla (2003)	Tormes (2002)
Bosque	88,57	66,90	77,32	67,14
Forestal no boscoso	61,94	59,86	34,12	63,54
Herbáceo	28,08	41,03	45,35	36,52
Cultivos	79,20	92,16	84,68	73,82
Improductivo	30,70	47,17	35,12	23,78
Agua	63,62	37,99	51,94	61,09

Respecto a la comparación de superficies, los mapas MCA50 y MFE50 (Tabla 2) indicaron un aumento de superficie de bosque entre principios de la década de los 90 y el principio de 2000 salvo en el Alto Duero, donde se observó cierta disminución. Sin embargo, para las mismas fechas, los mapas de la clasificación mostraron ligera disminución en todos los casos. Debe señalarse que el aumento entre el MCA50 y el MFE50 puede no responder a un aumento real de superficie de bosque sino a la redefinición de las categorías empleadas entre la elaboración de uno y otro. Respecto a la evolución, las superficies obtenidas por CORINE y los resultados de este trabajo coincidieron en que no hay tendencia clara de aumento o disminución de superficie de bosque.

Tabla 2. Comparación de superficies de bosque en las cuatro cuencas entre MCA50 y MFE50 y los mapas resultantes. Se indican entre paréntesis las fechas de los mapas utilizados en la comparación.

Superficie clase bosque (km ²)	Alto Duero	Carrión	Esla	Tormes
MCA50	765,0 (1991)	237,9 (1992)	1960,6 (1992)	398,5 (1991-92)
MFE50	744,2 (2004)	356,9 (2003)	3027,9 (2003)	573,6 (2002)
Clasificación	775,0 (1990)	311,0 (1994)	4995,7 (1994)	982,0 (1989-90)
	759,5 (2002)	259,9 (2001)	4677,0 (2003)	971,9 (2001)

Tabla 3. Comparación de superficies de bosque en las cuatro cuencas entre los dos mapas CORINE y los mapas resultantes. Se indican entre paréntesis las fechas de los mapas utilizados en la comparación.

Superficie clase bosque (km ²)	Alto Duero	Carrión	Esla	Tormes
CORINE	767,9 (1990)	488,3 (1990)	5192,1 (1990)	569,1 (1990)
	669,3 (2000)	495,2 (2000)	5336,6 (2000)	549,0 (2000)
Clasificación	775,0 (1990)	271,1 (1990)	4859,5 (1987)	982,0 (1989-90)
	761,8 (2000)	273,4 (2000)	4708,0 (2000)	964,5 (2000)

3.3. Tendencias

El resultado de la aplicación del test de MK a las superficies resultantes de las series de mapas de cada cuenca indicó en todos los casos que la superficie de bosque no ha aumentado durante el periodo de estudio. Al contrario, en algunos casos, como en el Carrión y en el Esla, pero sobre todo en el Alto Duero, se ha producido disminución. En el caso del Tormes la superficie de bosque no mostró ninguna evolución, mientras que la superficie de herbáceas aumentó a costa de la disminución de la clase forestal no boscosa. En el caso del Esla el bosque disminuyó a costa de un aumento de magnitud similar de la cubierta forestal no boscosa, y la disminución de cultivos fue simultánea al aumento de las cubiertas herbáceas.

4. Conclusiones

Se ha propuesto la utilización de series temporales largas de imágenes Landsat, entre 1970 a la actualidad, para su transformación en mapas de usos/coberturas de suelo. El objetivo ha sido estudiar la evolución de la superficie forestal en cuatro sub-cuencas de la cuenca del Duero. Los mapas resultantes permitieron estudiar la evolución de los usos/coberturas y determinar los cambios en las superficies forestales. El método aplicado fue el de clasificación supervisada con refinamiento de resultados. Este método ha demostrado que se pueden aislar y eliminar los errores inherentes al propio procedimiento y/o debidos a un cambio de leyenda en los mapas históricos usados para validación. Los mapas resultantes, pues, expresan las variaciones en las superficies debidas a cambios reales de carácter prolongado en las coberturas de suelo. El análisis de las series de mapas indicó que no ha habido cambios significativos en las superficies de las distintas cubiertas, pese a que se ha detectado un ligero descenso en la superficie de bosque en el último período de estudio. El análisis estadístico de tendencias corroboró que la superficie de bosque no ha aumentado durante el periodo de estudio, e incluso que ha disminuido ligeramente en tres de las cuatro sub-cuencas estudiadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Proyecto SA212A11-2 de la Junta de Castilla y León. Los autores también agradecen al United States Geological Survey (USGS) y a la Agencia Europea del Espacio (ESA) las imágenes Landsat.

Referencias

- Boletta, P. E., Ravello, A. C., Planchuela, A. M., & Grillo, M. (2006). Assessing deforestation in Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management*, 228, 108–114.
- Castilla, G., & Hay, G. J. (2006). Uncertainties in land use data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3, 3439-3472.

- Chavez, P. S., Jr. (1996). Image-based atmospheric corrections-Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (9), 1025-1036.
- Cohen, W.B., Yang, Z., & Kennedy, R. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync-Tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2911-2924.
- DeFries, R.S., & Townshend, J.R.G. (1999). Global land cover characterization from satellite data: From research to operational implementation? *Global Ecology and Biogeography*, 8, 367-379
- Hamed, K.H. (2009). Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 368 (1-4): 143-155.
- Huang, C., Kim, S. Song, K., Townshend, J. R.G., Davis, P., Altstatt, A., Rodas, O., Yanosky, A., Clay, R., Tucker, C. J., & Musinsky, J. (2009). Assessment of Paraguay's forest cover change using Landsat observations. *Global and Planetary Change*, 67 (1-2),1-12.
- Lasanta, T. González-Hidalgo, J.C., Vicente-Serrano, S., & Sferi, E. (2006). Using landscape ecology to evaluate an alternative management scenario in abandoned Mediterranean mountain areas. *Landscape and Urban Planning*, 78 (1-2), 101-114.
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (5), 823-870.
- Mayaux, P., Pekel, J.-F., Desclée, B., Donnay, F., Lupi, A., Achard, F., Clerici, M., Bodart, C., Brink, A., Nasi, R. & Belward, A. (2013). State and evolution of the African rainforests between 1990 and 2010. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368 (1625), online doi:10.1098/rstb.2012.0300.
- Pekkarinen, A., Reithmaier, L., & Strobl, P. (2009). Pan-European forest/non-forest mapping with Landsat ETM+ and CORINE land cover 2000 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 171-183.
- Skole, D., & Tucker, C.J. (1993). Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 250, 1905-1910.
- Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., & Macomber, S.A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?. *Remote Sensing of Environment*, 75, 230-244.
- Vittek, M. Brink, A., Donnay, F., Simonetti, D. & Desclée, B. (2014) Land Cover Change Monitoring Using Landsat MSS/TM Satellite Image Data over West Africa between 1975 and 1990. *Remote Sensing*, 6, 658-676.
- Yuan, F., Sawaya, K.E., Loeffelholz, B. 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.
- Zhu, Z., & Woodcock, C.E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152-171.