

## Fusionado de imágenes Terra-MODIS y Landsat-TM/OLI en el contexto del análisis del incendio forestal de Las Hurdes (Cáceres)

D. Borini Alves<sup>1,2</sup>, R. Montorio Llovería<sup>1</sup>, F. Pérez-Cabello<sup>1</sup>, L. Vlassova<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Grupo GEOFOREST-IUCA, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

<sup>2</sup> CAPES Foundation, Setor Bancário Norte, Quadra 2, Bloco L, Lote 06, Brasília, Brasil.

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.

*dborini@unizar.es, montorio@unizar.es, fcabello@unizar.es, vlassova@unizar.es*

**RESUMEN:** En los estudios de teledetección ambiental las técnicas de fusión de imágenes son cada vez más utilizadas para superar limitaciones de resolución espacial, espectral o temporal asociadas al uso de un único sensor. En este contexto, este trabajo explora, en el marco del estudio de los incendios forestales, la combinación de los sensores TERRA-MODIS y Landsat-TM/OLI a través del algoritmo STARFM; un algoritmo de fusión que simula imágenes con la resolución espacial de Landsat a partir de los registros diarios de reflectividad de MODIS. La evaluación de este algoritmo ha sido desarrollada en el área afectada por el incendio forestal de Las Hurdes (Cáceres) de verano de 2009 y su entorno. Se han abordado procesos de simulación para predecir las imágenes de dos fechas: 29/07/09 (postfuego inmediato) y 08/07/13 (4 años después del fuego). La disponibilidad de las imágenes reales ha permitido comparar banda a banda (rojo, NIR y SWIR) los valores de reflectividad y comprobar el potencial de los índices derivados para su integración en el análisis multitemporal de los incendios forestales. El proceso de validación ha mostrado valores de ajuste ( $R^2$ ) siempre superiores a 0,85. Asimismo, se destaca el peor comportamiento de la banda del NIR y la marcada influencia en los resultados de la fecha escogida como par predictor. La comparación de los índices de severidad (dNBR) y vegetación (NDVI) reales y simulados refleja un elevado acuerdo a nivel estadístico y cartográfico, demostrando así su capacidad para evaluar el estado del área quemada inmediatamente después del fuego y estudiar su regeneración vegetal posterior.

**Palabras-clave:** fusión de imágenes, STARFM, severidad del incendio, regeneración vegetal postincendio.

### 1. INTRODUCCIÓN

Entre las tendencias actuales de los estudios de teledetección ambiental son muchas las investigaciones que buscan ampliar el universo de datos de análisis a través de la aplicación de técnicas de fusión de imágenes (Zhang, 2010). Estas técnicas permiten superar las limitaciones de resolución espacial, espectral o temporal asociadas a la utilización de un único sensor, contribuyendo así al análisis de la dinámica de los procesos ecológicos y de los impactos humanos en los fenómenos estudiados (Alparone et al., 2015).

En el ámbito del análisis de los incendios forestales, las imágenes Landsat han demostrado ser una importante fuente de información permitiendo, entre otras aplicaciones, delimitar las áreas quemadas (Bastarrika et al., 2011), evaluar sus efectos (Wimberly y Reilly, 2007) o realizar un seguimiento de su dinámica (Röder et al., 2005). Con un tamaño de píxel de 30 m, seis bandas espectrales de registro y una frecuencia de paso de 16 días, el satélite Landsat ofrece una resolución espacial, espectral y temporal que permite el seguimiento de los incendios forestales. Sin embargo, el intervalo de revisita de 16 días combinado con posibles condiciones meteorológicas adversas, como una alta cobertura de nubes, puede limitar el potencial de análisis de sus sensores al impedir disponer de información espectral de momentos clave como, por ejemplo, la imagen inmediata del postfuego o, simplemente, imágenes que permitan disponer de una serie temporal continua.

Para superar estas limitaciones existe una serie de estudios que buscan aprovechar la disponibilidad diaria de los productos del sensor MODIS, fusionando su alta resolución temporal con la mayor resolución espacial de Landsat a través del algoritmo *Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model* –

STARFM (Gao et al., 2006) que ha sido aplicado a temáticas muy variadas como la estimación de GPP (Singh, 2011), las medidas de evapotranspiración (Cammalleri et al., 2014), la cartografía de usos del suelo (Senf et al., 2015), o el estudio de los cambios fenológicos de la vegetación (Walker et al., 2012), entre otras.

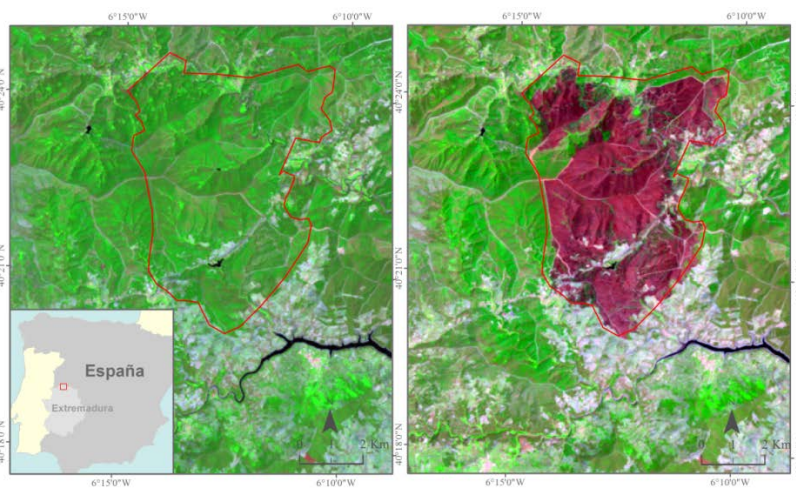
El presente trabajo tiene como objetivo general explorar la combinación de los productos de reflectividad de superficie de los sensores TERRA-MODIS y Landsat-TM/OLI a través del algoritmo STARFM en el marco del análisis de los incendios forestales. Concretamente, este estudio busca evaluar el potencial de las imágenes simuladas con STARFM en dos casos específicos: i) simulación de la imagen postfuego más cercana a la fecha del incendio para la evaluación de su severidad y ii) simulación de una imagen en el contexto de un análisis multitemporal de regeneración vegetal.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio, con un total de 13700 ha, está situada en Las Hurdes (Cáceres), al norte de la comunidad autónoma de Extremadura (Figura 1). Este área contiene la superficie afectada por un incendio forestal entre los días 25-28 de julio de 2009, en el que se quemaron aproximadamente 3000 ha. De acuerdo con el Tercer Inventario Forestal Nacional (DGMN, 2011), aproximadamente 40% del área quemada se encontraba ocupada por una cobertura vegetal arbórea, con predominio de bosques de coníferas (*Pinus pinaster*), además de otras especies vegetales como *Arbutus unedo* o *Quercus ilex*. El paisaje corresponde a una zona montañosa con variaciones de altitud entre los 390-1280 m. Con un clima mediterráneo, la temperatura media anual es de 16 °C, el volumen de precipitación anual de 550 mm, y presenta un período de sequía entre los meses de junio y septiembre (Núñez y Sosa, 2001).

El incendio de Las Hurdes del verano de 2009 constituye un caso de estudio con una buena cobertura temporal de imágenes Landsat ya que se dispone, por ejemplo, de una imagen postfuego registrada con carácter inmediato y de una serie temporal continua en los años sucesivos. Precisamente por ello se ha considerado que es una zona adecuada para la evaluación de los procesos de fusión con STARFM, ya que la disponibilidad de imágenes de referencia permite validar las imágenes Landsat simuladas y, por tanto, adelantar resultados de cara a su integración en estudios en los que exista una carencia real de imágenes.



**Figura 1.** Localización del área de estudio. A la izquierda, imagen Landsat TM del 13 de julio de 2009 (prefuego). A la derecha, imagen Landsat TM del 29 de julio de 2009 (postfuego). Ambas imágenes están visualizadas con una composición en falso color RGB 743, destacando el perímetro del incendio (polígono rojo).

### 2.2. Procedimientos metodológicos

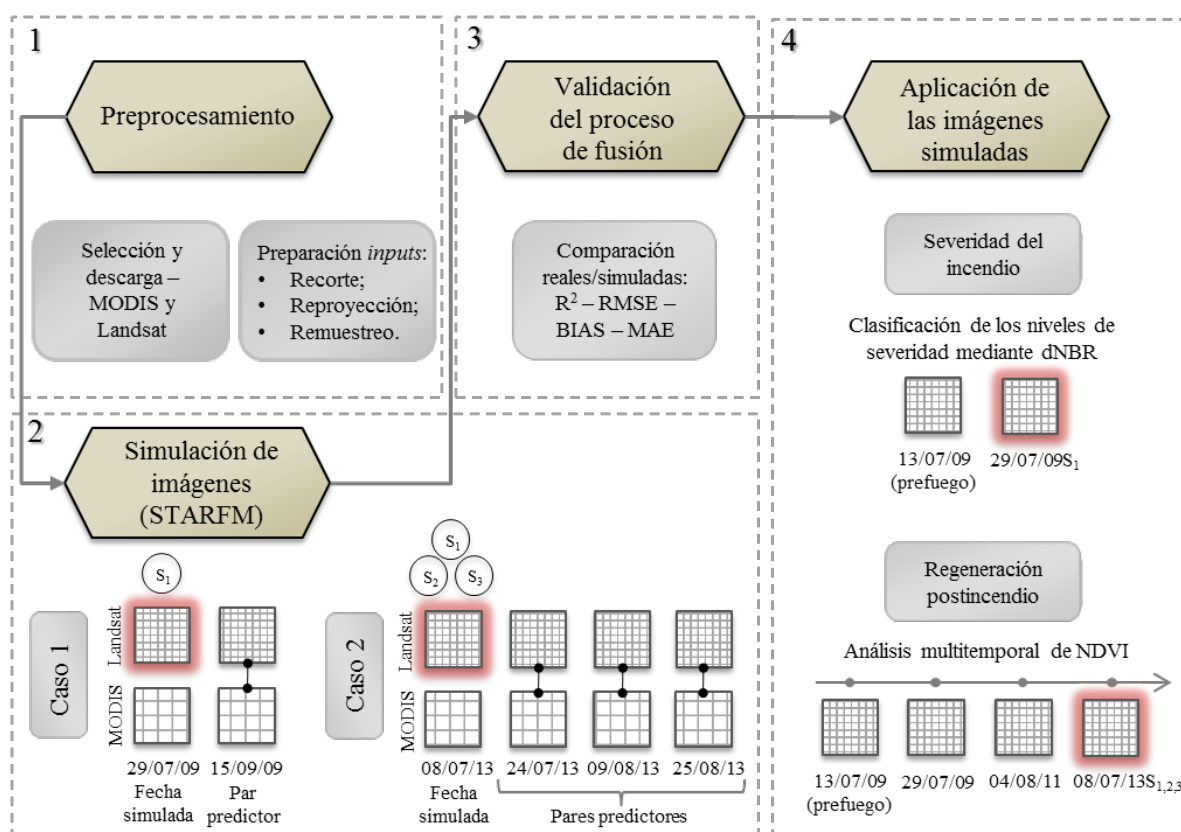
De acuerdo con los objetivos planteados, el estudio se dividió en cuatro etapas principales (Figura 2). Los siguientes apartados describen los pasos asociados a cada una de estas etapas.

#### 2.2.1. Preprocesamiento de las imágenes TERRA-MODIS y Landsat-TM/OLI

El preprocesamiento se inició con la selección y descarga de los productos Landsat *Surface Reflectance*

(*path/row* - 203/32) y MODIS *Land Surface Reflectance* (*horizontal/vertical* - 17/04) (disponibles en <https://earthexplorer.usgs.gov>), obteniendo un total de seis pares para las siguientes fechas: 29/07/09, 15/09/09, 08/07/13, 24/07/13, 09/08/13 y 25/08/13. Adicionalmente, fueron descargadas dos imágenes Landsat de las fechas 13/07/09 y 04/08/11 con el objetivo de complementar la serie temporal para el seguimiento del proceso de regeneración vegetal. Se ha trabajado con las bandas del rojo, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) de Landsat (bandas 3, 4 y 7 del sensor TM o bandas 4, 5 y 7 del sensor OLI) y de TERRA-MODIS (bandas 2 y 3 del producto MOD09GQ - 250 m de resolución espacial - y banda 16 del producto MOD09GA - 500 m de resolución espacial).

En cumplimiento de los requisitos de aplicación del algoritmo STARFM, los pares de imágenes pasaron por procesos adicionales de procesamiento (reproyección, remuestreo y recorte) reproducidos banda a banda. El resultado fue la obtención de imágenes ráster de igual tamaño (603 líneas y 512 columnas), proyección (UTM/30N - WGS84), resolución espacial (30 metros) y escala de medida de la reflectividad (tantos por 10000).



**Figura 2.** Esquema metodológico que resume las fases de trabajo desarrolladas.

### 2.2.2. Aplicación del algoritmo de fusión STARFM

Tras la preparación de los requisitos para la fusión, la combinación de las imágenes se procesó utilizando el algoritmo STARFM. Este algoritmo opera en base a un análisis de vecindad (ventana móvil) en el que se establece una ponderación entre píxeles espectralmente similares en la imagen de baja resolución MODIS y la imagen de media resolución Landsat. De este modo, dado un par de imágenes Landsat-MODIS adquiridos en  $t_0$  (par predictor) y una imagen MODIS adquirida en  $t_k$  (fecha simulada), STARFM simula la reflectividad en  $t_k$  con la resolución espacial de Landsat (Gao et al., 2006). Todas las simulaciones se han realizado aplicando los parámetros estándar del modelo.

De acuerdo con los objetivos planteados, el procesamiento de las simulaciones fue dividido en dos casos:

- **Caso 1:** simulación de la imagen postfuego inmediata para la evaluación de la severidad del incendio como punto de partida en el análisis de la dinámica multitemporal. Este caso se abordó a partir de la generación de una imagen Landsat simulada para la fecha 29/07/09 ( $S_1$ ) a partir de un par predictor del 15/09/09 (distancia de 48 días respecto a la imagen de referencia).

- Caso 2: simulación de una imagen en el contexto del análisis multitemporal de la regeneración vegetal, comprobando el efecto asociado a la fecha del par predictor. Para la resolución de este caso la imagen de principios de verano de 2013 (08/07/13) fue simulada ( $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ ) a partir de tres pares MODIS/Landsat predictores de distintas fechas: 24/07/13, 09/08/13 y 25/08/13, distanciadas 16, 32 y 48 días de la imagen de referencia, respectivamente.

### 2.2.3. Validación de los valores de reflectividad de superficie de las imágenes simuladas

El primer aspecto a destacar del proceso de validación es que para todas las imágenes simuladas se dispone de una correspondiente imagen Landsat real, lo que da soporte al proceso de evaluación.

De este modo, los resultados fueron analizados contrastando el comportamiento espectral de las bandas del rojo, NIR y SWIR de las imágenes simuladas frente a las reales. Para ello, se utilizó un muestreo aleatorio de puntos del 10% del área de estudio ( $n = 34302$  puntos), excluyendo de este muestreo las superficies de agua por no ser objeto de estudio de este trabajo y generar distorsiones en la interpretación de los resultados del proceso de fusión. Los estadísticos utilizados fueron  $R^2$ , RMSE (1), BIAS (2) y MAE (3), índices habitualmente aplicados en la validación de imágenes fusionadas (Bindhu y Narasimhan, 2015; Emelyanova et al., 2013; Zhu et al., 2010).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{n}} \quad (1) \quad BIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})}{n} \quad (2) \quad MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|\phi_i - \phi_{iobs}|}{n} \quad (3)$$

donde  $\phi_i$  es el valor predicho,  $\phi_{iobs}$  es el valor observado y  $n$  es el número de puntos.

Adicionalmente a este análisis se calcularon las imágenes de diferencia entre los valores reales y simulados, con el objetivo de identificar las posibles áreas de infravaloración y sobrevaloración de la reflectividad como resultado del proceso de fusión.

### 2.2.4. Aplicación de las imágenes simuladas al análisis del incendio de Las Hurdes

Considerando los dos casos de estudio previamente descritos, la fase final del trabajo consiste en la integración de las imágenes simuladas en el contexto del incendio forestal de Las Hurdes.

En el primer caso de aplicación fueron calculados los niveles de severidad del incendio a partir del índice *differenced Normalized Burn Ratio* (dNBR), que expresa la relación entre las bandas NIR y SWIR de las fechas pre- y postfuego. En este estudio, los valores de dNBR fueron discretizados en cuatro categorías de severidad: no quemado, severidad baja, media y alta, adaptando los umbrales definidos por Key y Benson (2006). Los valores de dNBR y las categorías de severidad de la imagen postfuego real y simulada fueron comparados visual (cartografía de severidad) y estadísticamente ( $R^2$ , coeficiente Kappa de Cohen ponderado).

En el segundo caso se generó una base de datos para el seguimiento multitemporal del índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación a partir de la combinación de la información espectral de las bandas rojo y NIR. Este índice fue utilizado para el análisis de la regeneración vegetal dentro del perímetro quemado en 2009, contando con imágenes de cuatro fechas: prefuego (13/07/09 - Landsat TM), postfuego inmediato (29/07/09 - Landsat TM), dos años (04/08/11 - Landsat TM) y cuatro años después del incendio (08/07/13 - Landsat OLI). Las tres imágenes Landsat simuladas para esta última fecha fueron integradas a ese seguimiento multitemporal, evaluando de nuevo mediante análisis visual (cartografía de NDVI) y estadístico (RMSE, BIAS, MAE y coeficiente Kappa de Cohen ponderado) las diferencias entre los valores observados y simulados.

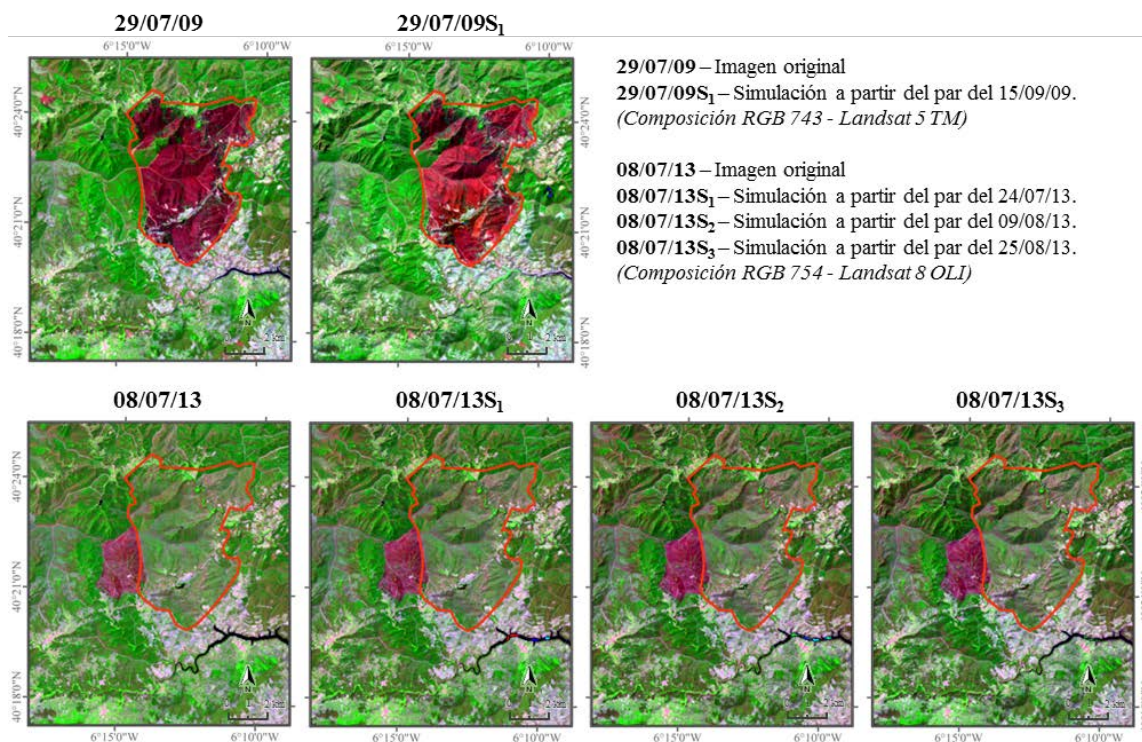
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Evaluación de la fusión con STARFM: análisis por bandas espectrales (rojo, NIR, SWIR)

La comparación de las imágenes Landsat simuladas con las imágenes reales permite valorar los resultados del algoritmo de fusión STARFM y, en consecuencia, evaluar su potencial para que los productos derivados de él puedan ser integrados en el análisis multitemporal de los incendios forestales. En este sentido, el análisis global a nivel visual (Figura 3) y el análisis estadístico banda a banda (rojo, NIR y SWIR) (Figura 4 y Tabla 1) refleja el elevado nivel de acuerdo existente entre los valores simulados y observados en las dos fechas estudiadas: 29/07/09 y 08/07/13.

El estudio detallado permite destacar algunas ideas asociadas al proceso de simulación que se desarrollan a continuación. El primer aspecto que debe ser señalado hace referencia a los buenos ajustes

alcanzados entre los valores observados y simulados para todas las bandas espectrales (Figura 4 y Tabla 1). En la simulación de la fecha 29/07/09, los valores de  $R^2$  se sitúan entre 0,85-0,90 y los valores de MAE y RMSE entre 0,01 y 0,021. En las simulaciones de la fecha 08/07/13 se aprecia que salvo en un único caso, la banda del NIR de la simulación 08/07/13S<sub>3</sub>, el  $R^2$  es siempre superior a 0,90. El rango de variación global de los estadísticos MAE y RMSE se sitúa entre 0,003 y 0,02; valores muy bajos, especialmente los de S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub> que se sitúan por debajo de 0,01. Todos estos valores de ajuste y error son acordes con los observados en otros estudios que han aplicado simulaciones con este mismo algoritmo (Bindhu and Narasimhan, 2015; Emelyanova et al., 2013; Gao et al., 2006; Senf et al., 2015).



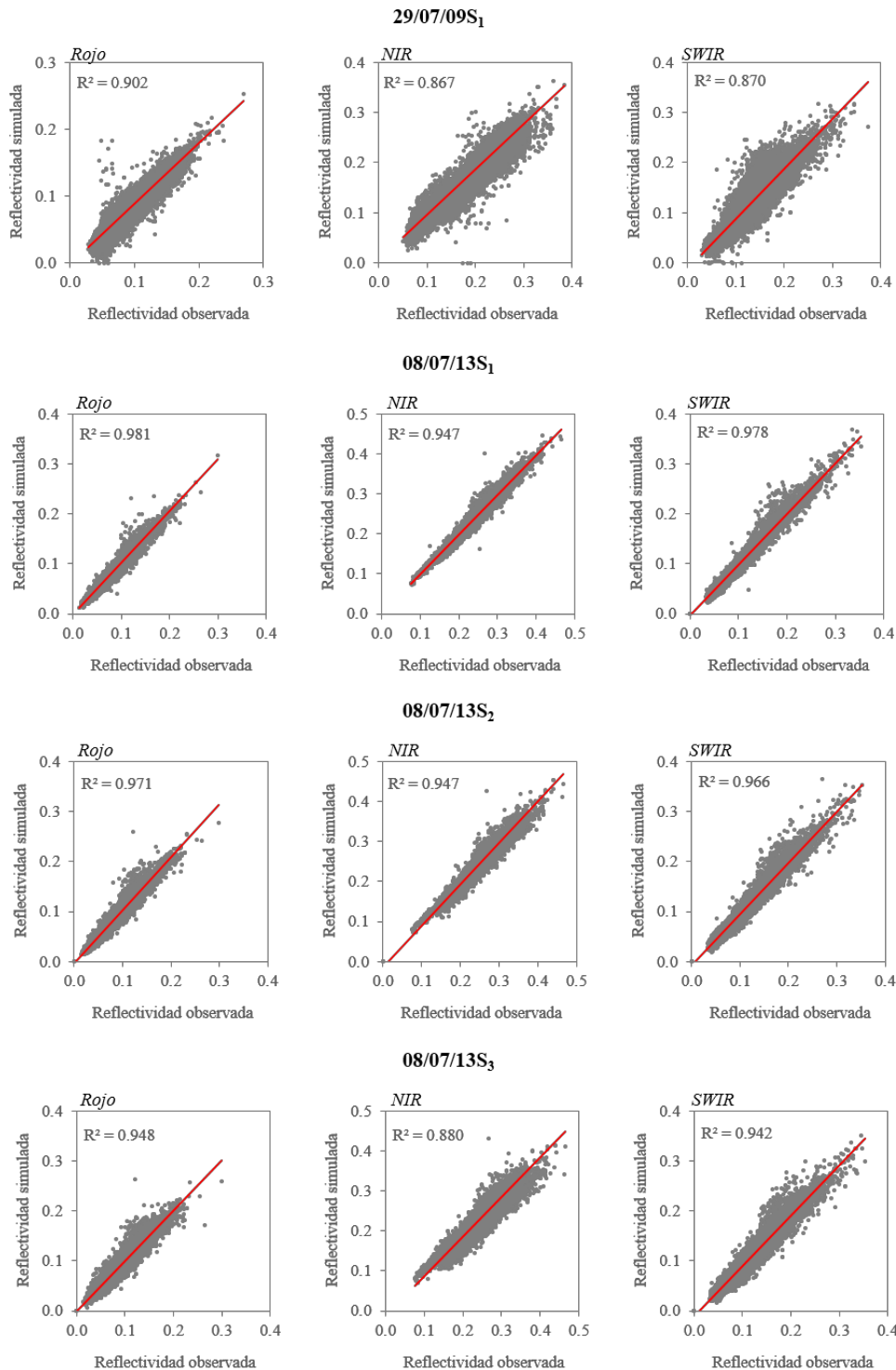
**Figura 3.** Composición en falso color de las imágenes Landsat reales (columna izquierda) y las imágenes Landsat fusionadas con STARFM (las columnas S<sub>n</sub> refieren a las distintas fechas del par predictor). La fila superior corresponde a la fusión de la imagen del 29 de julio de 2009 y la fila inferior a la imagen del 08 de julio de 2013.

La comparación entre bandas permite destacar que la banda del NIR es siempre la que registra peores valores de ajuste en las cuatro simulaciones aplicadas. A este respecto, cabe señalar que este comportamiento ha sido observado en otras investigaciones basadas en la fusión con STARFM (Walker et al., 2012; Zhu et al., 2010). Por otra parte, cabe destacar los buenos resultados obtenidos en las simulaciones del SWIR ( $R^2$  entre 0,87-0,98), considerando que la banda MODIS correspondiente procede de un producto con menor resolución espacial (MOD09GA - 500 m) que las bandas del rojo y NIR (MOD09GQ - 250 m).

El sesgo indica que, de forma general, la fusión con STARFM infraestima ligeramente los valores de reflectividad (BIAS entre 0 y -0,015) (Tabla 1). Esta infraestimación está asociada al hecho de que para simular la imagen de principios de verano (08/07/13) se están utilizando pares predictores que se acercan progresivamente a la transición hacia el otoño (hasta 25/08/13), lo que supone variaciones fenológicas de la vegetación (senescencia) y cambios de iluminación que resultan en la aparición de sombras topográficas. La misma situación se reproduce en la simulación de la fecha 29/07/09, donde la estimación de la imagen postfuego se realiza a partir de un par predictor de otoño (15/09/09). El efecto de las sombras, asociado a la variación de los cambios de iluminación en el par predictor, es apreciado en las imágenes de diferencia. La Figura 5, que muestra precisamente las diferencias en la banda del NIR, refleja claramente cómo en la transición de 08/07/13S<sub>1</sub> a 08/07/13S<sub>3</sub> son cada vez más visibles las características topográficas del área.

Una última cuestión a destacar, que subyace a la idea previamente comentada, hace referencia a la influencia que tiene sobre la simulación la fecha escogida como par predictor. Este hecho es claramente visible en las simulaciones de la fecha 08/07/13 del caso 2, donde S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub> derivan de pares predictores

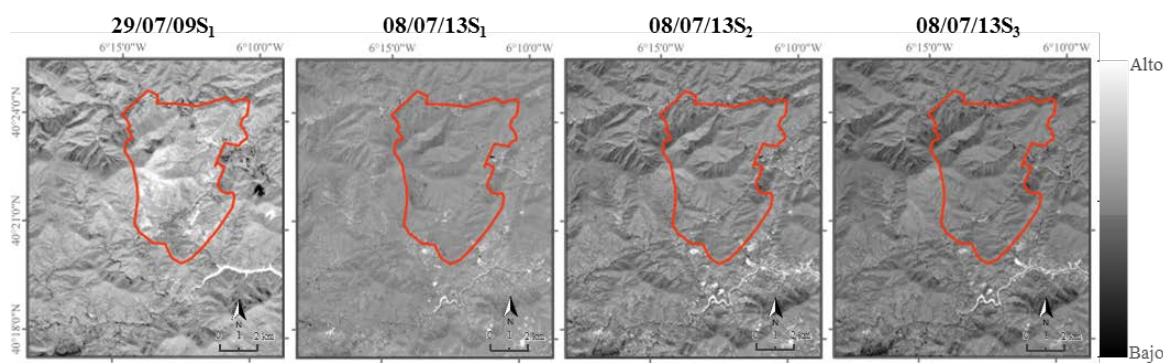
distanciados 16, 32 y 48 días, respectivamente. Por un lado, los estadísticos mostrados reflejan una disminución progresiva del ajuste al aumentar el tiempo transcurrido ( $S_1$ :  $R^2 > 0,97$ ;  $S_2$ :  $R^2 = 0,94-0,97$ ;  $S_3$ :  $R^2 = 0,88-0,95$ ) (Figura 4 y Tabla 1). Por otro lado, la aparición de sombras topográficas en la imagen de 08/07/13 se debe al peso que el detalle espacial de la imagen Landsat predictora tiene sobre la simulación. La simulación del 29/07/09 no permite observar el efecto progresivo pero los resultados son comparables con los de 08/07/13 $S_3$ , simulación con la que comparte la misma distancia temporal respecto al par predictor (48 días).



**Figura 4.** Gráficos de dispersión entre los valores de reflectividad observados y simulados (factor de escala = 1) para las bandas del rojo, NIR y SWIR en cada uno de los procesos de fusión aplicados.

**Tabla 1.** Estadísticos de validación de las imágenes simuladas.

| Índices | 29/07/09S <sub>1</sub> |        |        | 08/07/13S <sub>1</sub> |        |        | 08/07/13S <sub>2</sub> |        |        | 08/07/13S <sub>3</sub> |        |        |
|---------|------------------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|
|         | Rojo                   | NIR    | SWIR   | Rojo                   | NIR    | SWIR   | Rojo                   | NIR    | SWIR   | Rojo                   | NIR    | SWIR   |
| BIAS    | -0,010                 | -0,013 | -0,013 | 0,000                  | -0,002 | -0,003 | 0,000                  | -0,006 | -0,005 | -0,000                 | -0,014 | -0,009 |
| MAE     | 0,011                  | 0,016  | 0,017  | 0,004                  | 0,005  | 0,005  | 0,005                  | 0,009  | 0,007  | 0,006                  | 0,015  | 0,012  |
| RMSE    | 0,014                  | 0,021  | 0,021  | 0,005                  | 0,007  | 0,007  | 0,007                  | 0,012  | 0,009  | 0,008                  | 0,019  | 0,014  |



**Figura 5.** Imágenes de diferencia entre la reflectividad real y simulada en la banda del NIR. Nótese como los niveles de gris más oscuros (infraestimación) están asociados a las sombras topográficas y a la presencia de nubes.

### 3.2. Estimación de la severidad del incendio a partir de imágenes Landsat simuladas

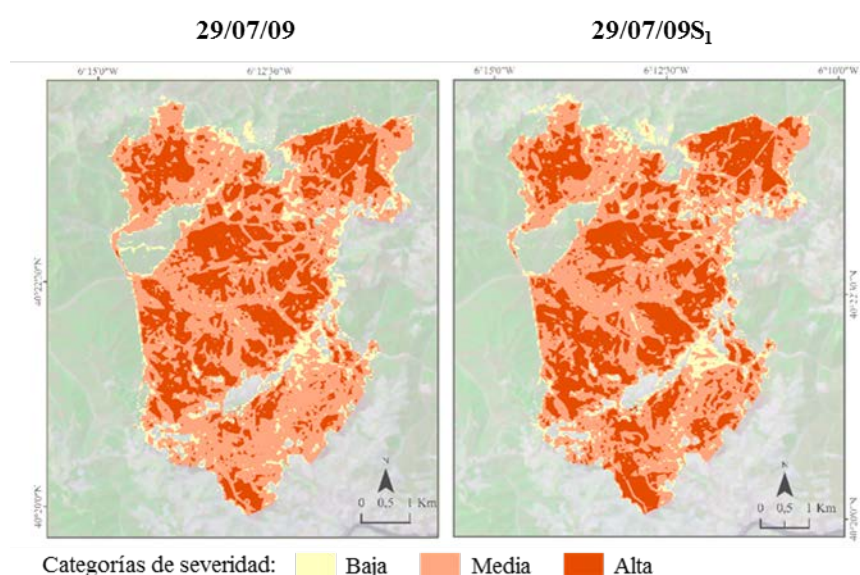
En el marco del análisis de la severidad del incendio resulta de especial interés el estudio de la distribución espacial de los valores del índice dNBR. En este sentido, en la Figura 6 (izquierda) se muestra la distribución espacial de este índice, calculado utilizando la imagen Landsat real, discretizado en cuatro categorías de severidad: no quemado, baja, media y alta. Tal como se observa y se refleja en la Tabla 2, el incendio de Las Hurdes se caracterizó por elevados niveles de severidad, ya que más del 70% del área aparece con niveles de severidad media o alta.

La simulación de la imagen postfuego a partir del par predictor del 15/09/09 genera unos valores de dNBR altamente correlacionados con los valores reales ( $R^2 = 0,94$ ). Además, es destacable que no existan diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) en el análisis de los valores promedio.

Como resultado de la buena relación entre los valores de dNBR absolutos se deriva un gran acuerdo en la categorización obtenida a partir de las imágenes real y simulada. La cartografía de severidad de la Figura 6 refleja visualmente este hecho que, en valores de acuerdo, se traduce en un coeficiente Kappa de 0,920 con un 83,8% de los puntos de la muestra aleatoria clasificados correctamente, un 8,4% de los casos sobreestimados y un 7,8% infraestimados (Tabla 2), nunca con cambios superiores a un intervalo de severidad.

**Tabla 2.** Tabla de contingencia de las categorías de severidad (valores en porcentaje).

|                                  |            | Categorías de severidad 29/07/09S <sub>1</sub> |      |       |      |       |
|----------------------------------|------------|--|------|-------|------|-------|
|                                  |            | No quemado                                     | Baja | Media | Alta | Total |
| Categorías de severidad 29/07/09 | No quemado | 16,3   | 0,9  | 0,0   | 0,0  | 17,2  |
|                                  | Baja       | 2,5  | 5,5  | 1,3   | 0,0  | 9,3   |
|                                  | Media      | 0,0  | 2,6  | 38,3  | 6,2  | 47,1  |
|                                  | Alta       | 0,0  | 0,0  | 2,7   | 23,7 | 26,4  |
|                                  | Total      | 18,8   | 9,0  | 42,3  | 29,9 | 100,0 |



**Figura 6.** Comparativa de la distribución espacial de las categorías de severidad del incendio de las Hurdes a partir de los valores de dNBR obtenidos con la imagen Landsat del 29/07/09 real (izda.) y simulada (dcha.). Las áreas no quemadas se visualizan con la imagen Landsat real en transparencia (RGB – 743).

### 3.3. Integración de imágenes Landsat simuladas en una serie temporal de regeneración vegetal

El proceso de regeneración vegetal, tal como se explica en el apartado de metodología, se aborda a partir del índice NDVI en una perspectiva multitemporal. Se han analizado los valores de NDVI de cuatro fechas que cubren cubren la situación prefuego y los cuatro años posteriores al incendio. Tal como muestra la Tabla 3, en todos los niveles de severidad se registra un aumento gradual del vigor vegetal. Como aspectos destacados del proceso de regeneración de este incendio de las Hurdes pueden señalarse los siguientes: (i) el incremento del NDVI promedio en el periodo 2009-2013 es de 0,280, siendo las áreas más severamente quemadas las que experimentan los mayores incrementos (0,394, 0,305 y 0,140 en las categorías de severidad alta, media y baja, respectivamente); (ii) la categoría de alta severidad registra los niveles de NDVI más elevados cuatro años después del fuego y (iii) en la última fecha analizada ninguna de las categorías de severidad registra los niveles de vigor vegetal existentes en la fecha prefuego.

**Tabla 3.** Seguimiento multitemporal del índice de vegetación NDVI mediante valores promedios y desviación estándar (DE) distribuido por categorías de severidad.

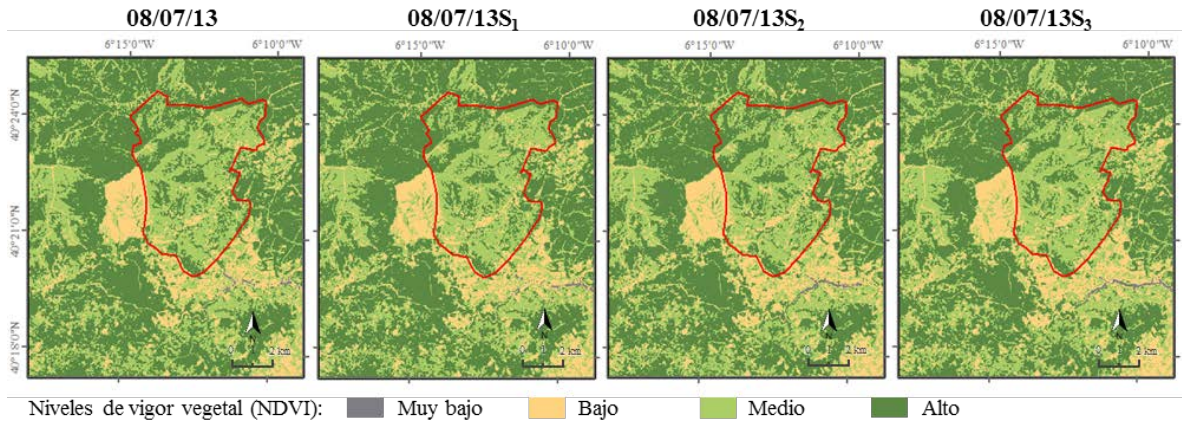
| Categorías de severidad |       | 13/07/09<br>(prefuego) | 29/07/09 | 04/08/11 | 08/07/13 | 08/07/13S <sub>1</sub> | 08/07/13S <sub>2</sub> | 08/07/13S <sub>3</sub> |
|-------------------------|-------|------------------------|----------|----------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| No Quemado              | Media | 0,453                  | 0,450    | 0,485    | 0,559    | 0,559                  | 0,554                  | 0,542                  |
|                         | DE    | 0,124                  | 0,126    | 0,110    | 0,154    | 0,159                  | 0,162                  | 0,155                  |
| Baja                    | Media | 0,453                  | 0,372    | 0,436    | 0,512    | 0,506                  | 0,498                  | 0,489                  |
|                         | DE    | 0,117                  | 0,128    | 0,104    | 0,137    | 0,141                  | 0,143                  | 0,134                  |
| Media                   | Media | 0,530                  | 0,199    | 0,393    | 0,504    | 0,498                  | 0,494                  | 0,486                  |
|                         | DE    | 0,079                  | 0,084    | 0,066    | 0,090    | 0,093                  | 0,094                  | 0,089                  |
| Alta                    | Media | 0,628                  | 0,138    | 0,414    | 0,532    | 0,530                  | 0,528                  | 0,524                  |
|                         | DE    | 0,044                  | 0,037    | 0,069    | 0,089    | 0,089                  | 0,091                  | 0,082                  |

La visión de la dinámica de regeneración vegetal que ofrece la imagen real de principios de verano de 2013 queda también reflejada en las tres imágenes simuladas (Tabla 3, columnas sombreadas en gris). Como ejemplo de este similar comportamiento se puede señalar que, frente al incremento real promedio de 0,280 señalado anteriormente, los valores promedio de incremento del NDVI son de 0,275, 0,270 y 0,263 para las simulaciones S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub>, respectivamente.

En la línea de lo indicado en la validación de los niveles de reflectividad de superficie, se observa una



infraestimación progresiva de los valores del NDVI conforme aumenta la distancia entre la fecha del par predictor y la imagen simulada (valores del estadístico BIAS de 0,000, -0,005 y -0,017 para  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , respectivamente). No obstante, los valores de los estadísticos de error son bajos (MAE y RMSE inferiores a 0,04 en todas las simulaciones) y el acuerdo en la categorización del NDVI es elevado desde el punto de visual (Figura 7) y estadístico (Kappa de Cohen de 0,930, 0,890 y 0,830 para  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , respectivamente).



**Figura 7.** Distribución espacial del NDVI en la imagen Landsat 08/07/13 real y sus respectivas simulaciones. Las categorías de vigor vegetal han sido establecidas considerando los umbrales de 0,1, 0,35 y 0,55.

#### 4. CONCLUSIONES

La posibilidad cada vez mayor de combinar informaciones de distintos sensores remotos a partir de algoritmos de fusión constituye una tendencia actual y un gran reto en el ámbito de los estudios de teledetección, desafiando a los actuales investigadores de esta rama de conocimiento a hacer el mejor uso de estas informaciones para la mejor comprensión de los problemas estudiados.

Dadas las características del trabajo de fusión desarrollado, con disponibilidad de imágenes Landsat reales, todo el estudio constituye un proceso de validación del uso de las imágenes simuladas para el análisis de los incendios en ambientes mediterráneos. En este sentido, se puede concluir que los resultados han demostrado el potencial del algoritmo STARFM para completar series multitemporales, lo que facilita el análisis de severidad y de regeneración en zonas quemadas.

Con carácter más específico pueden derivarse algunas conclusiones importantes:

- El ajuste entre los valores de reflectividad observados y simulados en las bandas del rojo, NIR y SWIR son elevados ( $R^2 > 0,85$ ) a pesar del sesgo existente entre las reflectividades de MODIS y Landsat, la gran diferencia en la resolución espacial de las imágenes fusionadas (ratio 8:1 y 16:1 en los productos MOD09GQ y MOD09GA, respectivamente) y la distancia temporal (48 días) en el par predictor.
- Comparativamente, la banda del NIR presenta un comportamiento menos óptimo en todas las simulaciones.
- Los resultados se encuentran influenciados por la fecha del par predictor. En este sentido, tres aspectos pueden destacarse: i) el aumento de la distancia temporal supone un descenso del ajuste con la imagen real, ii) la aplicación de simulaciones hacia delante o hacia atrás puede condicionar la sobre- o infraestimación de la reflectividad, dependiendo de la dinámica del ecosistema estudiado y iii) el peso que tiene la imagen Landsat predictor en el algoritmo de fusión provoca que su detalle espacial (sombras, nubes o cambios de usos del suelo) se traslade a la imagen simulada.

Con el objetivo de aplicar estos procesos de fusión a casos de estudio con problemas reales de disponibilidad de imágenes de satélite, se plantean tres posibles vías para profundizar en esta línea de trabajo: i) la búsqueda de mejores resultados a través del cambio en los valores por defecto de los parámetros del modelo o a partir del trabajo con imágenes normalizadas topográficamente, ii) el desarrollo de las simulaciones a partir de dos pares predictores (anterior y posterior a la fecha objetivo) para reducir el efecto asociado a la fecha de predicción y iii) la comprobación de otros algoritmos de fusión como el ESTARFM (Zhu et al., 2010), STAVFM (Meng et al., 2013) o STAARCH (Hilker et al., 2009), adaptados al comportamiento espectral mixto propio de ambientes heterogéneos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CAPES Foundation (Brasil) por la beca otorgada a Daniel Borini Alves (proceso n. 9540-13-0) y a SENESCYT-Ecuador por la financiación de la investigación predoctoral de Lidia Vlassova.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Alparone, L., Aiazzi, B., Baronti, S., Garzelli, A. (2015): *Remote Sensing Image Fusion*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Bastarrika, A., Chuvieco, E., Martín, M.P. (2011): "Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors". *Remote Sensing of Environment*, 115, 1003–1012.
- Bindhu, V.M., Narasimhan, B. (2015): "Development of a spatio-temporal disaggregation method (DisNDVI) for generating a time series of fine resolution NDVI images". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 57–68.
- Cammalleri, C., Anderson, M.C., Gao, F., Hain, C.R., Kustas, W.P. (2014): "Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion". *Agricultural and Forest Meteorology*, 186, 1–11.
- DGMN, Dirección General de Medio Natural (2011): *Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3)*. Madrid, Spain.
- Emelyanova, I. V., McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Tao Li, L., Van Dijk, A.I.J.M. (2013): "Remote Sensing of Environment Assessing the accuracy of blending Landsat – MODIS surface reflectances in two landscapes with contrasting spatial and temporal dynamics: A framework for algorithm selection", *Remote Sensing of Environment*, 133, 193–209.
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., Hall, F. (2006): "On the blending of the landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily landsat surface reflectance". *Trans. Geo. Sci. Remote Sens.* 44, 2207–2218.
- Hilker, T., Wulder, M. a., Coops, N.C., Linke, J., McDermid, G., Masek, J.G., Gao, F., White, J.C. (2009): "A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS". *Remote Sensing of Environment*, 113, 1613–1627.
- Key, C.H., Benson, N.C. (2006): "Landscape assessment: Sampling and analysis methods". En Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., Gangi, L.J. (Eds.). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, USA, 1–55.
- Meng, J., Du, X., Wu, B. (2013): "Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation". *International Journal of Digital Earth*, 6, 203–218.
- Núñez, M., Sosa, J.A. (2001): *Climatología de Extremadura (1961–1990)*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.
- Röder, A., Bährisch, S., Hill, J. (2005): "An interpretation framework for fire events and post-fire dynamics in Ayora / Spain using time-series of Landsat-TM and -MSS data". *New Strateg. Eur. Remote Sens.*, 51–60.
- Senf, C., Leitão, P.J., Dirk, P., Linden, S. Van Der, Hostert, P. (2015): "Mapping land cover in complex Mediterranean landscapes using Landsat: Improved classification accuracies from integrating multi-seasonal and synthetic imagery". *Remote Sensing of Environment*, 156, 527–536.
- Singh, D. (2011): "Generation and evaluation of gross primary productivity using Landsat data through blending with MODIS data". *Int. J. Appl. Earth Obs. and Geo*, 13, 59–69.
- Walker, J.J., De Beurs, K.M., Wynne, R.H., Gao, F. (2012): "Evaluation of Landsat and MODIS data fusion products for analysis of dryland forest phenology". *Remote Sensing of Environment*, 117, 381–393.
- Wimberly, M.C., Reilly, M.J. (2007): "Assessment of fire severity and species diversity in the southern Appalachians using Landsat TM and ETM+ imagery". *Remote Sensing of Environment*, 108, 189–197.
- Zhang, J. (2010): "Multi-source remote sensing data fusion: status and trends". *International Journal of Image and Data Fusion*, 1, 5–24.
- Zhu, X., Chen, J., Gao, F., Chen, X., Masek, J.G. (2010): "An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions". *Remote Sensing of Environment*, 114, 2610–2623.