



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Facultat de Física
Departament de Física de la Terra i Termodinàmica

**Observación multiescala de la cubierta
vegetal mediante Teledetección.
Aplicación a Castilla- La Mancha.**

DOCTORADO EN FÍSICA

Doctorando:

Cecilia Martínez Beltrán

Directores de Tesis:

Joaquín Meliá Miralles

Alfonso Calera Belmonte

Valencia, mayo de 2014

D. Joaquín Meliá Miralles, *Catedrático de Universidad. Universitat de València.*

D. Alfonso Calera Belmonte, *Catedrático de Escuela Universitaria. Universidad de Castilla- La Mancha.*

CERTIFICAN:

Que la presente memoria "*Observación multiescala de la cubierta vegetal mediante Teledetección. Aplicación a Castilla- La Mancha*", recoge el trabajo realizado, bajo su dirección, por Cecilia Martínez Beltrán para optar al grado de Doctor en Física.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firman el presente certificado en Burjassot (Valencia), a 6 de mayo de 2014.

D. Joaquín Meliá Miralles

D. Alfonso Calera Belmonte

RELACIÓN DE ENTIDADES Y PROYECTOS QUE HAN AYUDADO EN LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO:

- Convenio ERMOT. Estudio sobre la evolución de las superficies de Regadío en el ámbito del acuífero Mancha Oriental mediante el empleo de técnicas de Teledetección). Convenio de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Júcar, Consejería de Agricultura de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental y la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Proyecto DEMETER. DEMonstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services. FP5. 2002-2005. University of Castilla La Mancha.
- Proyecto PLEIADeS. Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support. FP6. 2006-2009. University of Castilla La Mancha.
- Proyecto SIRIUS. Sustainable Irrigation water management and River-basin governance: implementing User-driven Services. FP7-SPACE-2010-1. 2010-2013. <http://www.sirius-gmes.es/> . University of Castilla La Mancha.
- Proyecto EBHE. Evapotranspiración, Balance Hídrico y Estrés de la cubierta. GCL2008-04047. Plan Nacional de Ciencia y Tecnología. 2009-2011. Universidad de Castilla La Mancha.
- Proyecto CERESS. **C**oupling land surface **E**nergy and water balance from **R**emote sensing for mapping **E**vapotranspiration, **W**ater **S**tress and **S**oil Moisture. Plan Nacional de Investigación. Ministerio de Economía e Innovación. 2012-2014. <http://www.hidromore.es/>

A mis padres, Aniceto y Cecilia

A David

A Ceci, David y Martina

Agradecimientos

La realización de esta Tesis Doctoral está unida a mi colaboración en la Sección de Teledetección y SIG de la Universidad de Castilla-La Mancha desde Abril de 1996. Durante todos estos años, he obtenido conocimientos, preparación y la finalización de esta tesis, por lo que me siento orgullosa y sobretodo muy agradecida, tanto a las personas que me han ayudado en este trabajo como a las que forman parte de mi vida.

En primer lugar quiero expresar mi más sentido agradecimiento al Dr. Alfonso Calera, por su dirección en esta Tesis y por su confianza durante todos estos años. Su ayuda en los razonamientos y análisis realizados, así como en la redacción y revisión, han hecho posible la elaboración de esta Tesis. Espero haber aprendido de su capacidad de trabajo, constancia y actitud práctica.

Muy especialmente también quiero agradecer al Dr. Joaquín Meliá su trato amable y su comprensión. Por aceptar la realización de esta Tesis bajo su dirección.

También me gustaría extender mi gratitud a todas las personas que he conocido y con las que he colaborado y trabajado en la Sección de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, donde se han desarrollado los trabajos que aquí se presentan. En primer lugar Al Dr. Santiago Castaño, director del Instituto de Desarrollo Regional, que permitió que me iniciara en la labor de investigación. A D. Antonio Quintanilla, responsable del área de desarrollo SIG, de quien siempre he recibido un trato amable y afectuoso desde que comencé en esta sección.

Al Dr. Jose González-Piqueras quiero agradecerle haberme transmitido su perfeccionismo y perseverancia ante el trabajo, así como sus consejos y conversaciones durante todo este tiempo. A la Dra. Anna Osann, por tansmitirme su visión más positiva y su ánimo ante la realización de esta tesis. Al Dr. Isidro Campos, quiero agradecerle sus consejos para la elaboración de este documento. A Javier Sánchez por todas las veces que me ha ayudado en lo que a temas informáticos se refiere.

Un agradecimiento muy especial merecen quienes forman parte de mi vida más personal, por su comprensión, paciencia, apoyo y por estar siempre a mi lado. Por su esfuerzo y sacrificio.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS -----	25
1.1 Seguimiento multitemporal de la superficie terrestre.-----	25
1.2 Constelación multisensor -----	27
1.2.1 Intercomparación entre sensores-----	27
1.3 Zona de estudio -----	33
1.4 Objetivos de la Tesis-----	35
1.5 Estructura de la memoria -----	36
CAPÍTULO II : MÉTODOS UTILIZADOS Y PROCESADO DE IMÁGENES. -----	39
11.1 Procesado básico de imágenes -----	40
11.2 Imágenes utilizadas. Descripción y características de los sensores-----	42
11.3 Corrección geométrica -----	44
11.4 Procedimiento de calibración radiométrica-----	45
11.4.1 Conversión a radiancias espectrales. -----	45
11.4.1.1 Conversión a radiancias espectrales para las imágenes DEIMOS. 51	
11.4.2 Conversión a reflectividades TOA -----	52
11.5 Corrección atmosférica-----	54
11.5.1 Procedimiento aplicado para la corrección atmosférica de las imágenes Landsat 5- TM y Landsat 7- ETM+. -----	57
11.5.1.1 Descripción y características técnicas del método -----	59
11.5.2 Procedimiento aplicado para la corrección atmosférica de las imágenes MODIS-----	61
11.5.2.1 Implementación del algoritmo-----	63
11.5.2.2 Resumen del algoritmo -----	65
11.5.3 Procedimiento aplicado para la corrección atmosférica de las imágenes FORMOSAT.-----	67
11.5.3.1 Descripción del método de corrección atmosférica usado en FORMOSAT -----	68
11.5.4 Un procedimiento de normalización absoluta del NDVI-----	71
11.5.4.1 Procedimiento de normalización basado en superficies invariantes -----	72
11.5.4.2 Procedimiento de Normalización Absoluta de NDVI_TOA -----	73
11.5.4.3 Determinación de los valores absolutos de NDVI para superficies invariantes de suelo desnudo y vegetación muy densa.-----	75

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PARA LA COMPARACIÓN ENTRE SENSORES DE DIFERENTE RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL .	79
III.1 Intercomparación entre sensores	81
III.2 Imágenes utilizadas, de alta- media y baja resolución espacial, para la aplicación de nuestra metodología	84
III.2.1 Cálculo y agregación de NDVI	86
III.3 Metodología aplicada para la intercomparación entre sensores	88
III.3.1 Efectos de la incertidumbre en la georreferenciación: tests de hipótesis	92
III.3.2 Método de zonas homogéneas	96
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA COMPARACIÓN ENTRE SENSORES DE ALTA- MEDIA Y SENSORES DE BAJA RESOLUCIÓN ESPACIAL.	99
IV.1 Sensores de alta- media resolución. Resultados y discusión.	100
IV.1.1 Comparación de TM vs ETM+	100
IV.1.1.1 Calibración de TM vs ETM+: Nuevos coeficientes de calibrado para Landsat 5 TM	101
IV.1.1.2 Efecto de la agregación espacial	104
IV.2 Intercalibración de NDVI con otros sensores de alta- media resolución espacial.	105
IV.2.1 ETM+ vs. LISS- III 1D	105
IV.2.2 ETM+ vs. QuickBird	107
IV.2.3. ETM+ vs. ASTER	112
IV.3. Estabilidad temporal de las relaciones lineales obtenidas	114
IV.3.1. Caso ETM+ vs. AVHRR	115
IV.4. Resumen de las ecuaciones lineales para aplicaciones operacionales	117
IV.5. Comparativa del método propuesto de normalización frente a métodos de corrección atmosférica absoluta.	119
4.5.1.- Comparación de procedimientos de corrección y normalización atmosféricas en la Zona 1.	123
4.5.2.- Comparación de procedimientos en la Zona 2	126
IV.6. Conclusiones y recomendaciones	134
CAPÍTULO V: CONSTELACIÓN MULTISENSOR PARA EL SEGUIMIENTO TEMPORAL DE LA SUPERFICIE TERRESTRE.	137
V.1 Sensores e imágenes utilizados	138
V.2 Intercomparación entre imágenes cuasi-síncronas y discusión	140
V.2.1 Comparación de FORMOSAT vs Landsat 5	141
V.2.2 Comparación de DEIMOS vs FORMOSAT	143

V.2.3 Comparación de DEIMOS vs Landsat- 7. -----	144
V.3 Conclusiones generales de nuestra comparación -----	146
V.4 Una constelación multisensor: seguimiento temporal de cubiertas vegetales tipo y comportamiento de la constelación -----	147
V.4.1 Herramienta SPIDER-----	147
V.5.2 Evolución temporal de cubiertas vegetales tipo-----	151
V.5.3 Comportamiento de la constelación en el seguimiento de la vegetación. -----	156
V.6 Conclusiones-----	161
CAPÍTULO VI.: CONCLUSIONES. PERSPECTIVAS Y APLICACIONES-----	163
VI.1 Conclusiones-----	163
VI.2 Perspectivas y aplicaciones-----	166
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	171

Índices

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Composición color RGB 543 del 20 de Mayo de 2003 de Landsat 5-TM, sobre la cual se muestran las mallas de 1000m de las zonas 1 y 2 utilizadas en la aplicación de la metodología. -----	34
Figura I.2. Proceso de trabajo aplicado a las imágenes disponibles de los diferentes sensores para la obtención de una serie consistente de imágenes multitemporal y multiespacial.-----	38
Figura II.1. Diagrama de flujo de los pasos llevados a cabo para el procesado de las imágenes, previamente a la agregación y a la comparación entre sensores. -----	41
Figura II.2. Fechas de las imágenes disponibles de los sensores indicados, de los años 2001 y 2004. -----	43
Figura II.3. Fechas de las imágenes disponibles de los sensores indicados, de los años 2009 y 2010. -----	43
Figura II.4. Diagrama de flujo de la corrección atmosférica (versión 1) de las imágenes de MODIS (Vermote and Vermeulen, 1999).-----	62
Figura II.5. Esquema de una primera versión de la función de inversión de aerosoles (Hagolle et al, 2008). En esta versión el algoritmo de minimización de Levenberg–Marquardt obtiene las propiedades ópticas de los aerosoles de los días D y D+2 que minimizan las diferencias entre las reflectividades de superficie de los días D y D+2. -----	68
Figura II.6. Esquema de la versión actual de la función de inversión de aerosol -----	70
Figura II.7.- Espectros de reflectividad de suelo desnudo, arriba, y vegetación densa, abajo, junto con la función de respuesta espectral del sensor TM de Landsat 5. -----	76
Figura II.8. Comparación del NDVI obtenido mediante la normalización de zonas invariantes y el NDVI corregido atmosféricamente para la fecha del 20 de Mayo de 2003.-----	78

Figura III.1. Relación obtenida entre la "Agregación de NDVI" (Proceso 1) frente al "NDVI obtenido de "Radiancias agregadas" (Proceso 2), para cinco diferentes tamaños de malla-----	87
Figura III.2. Proceso para comparar las observaciones procedentes de diferentes sensores con diferente resolución espacial: Se muestra un ejemplo para Landsat7-ETM+ y Landsat5-TM+ (Martinez et al. 2003) para la malla de 200 m x 200 m. La intersección entre la malla y las reflectividades o el NDVI nos permite obtener para cada celda de la malla el valor medio de los 64 píxeles intersectados de cada sensor. -----	90
Figura III.3. Comparación del NDVI de TM (31 Mayo 2001) con ETM+ (30 Mayo 2001) para cinco tamaños de malla diferentes.-----	91
Figura III.4. Imagen de NDVI de Landsat 7-ETM+ desplazada 0.5 pixel vs. la misma imagen pero sin desplazar, para cada tamaño de malla de 30 Mayo 2001. -----	93
Figura III.5. Comparación de la imagen Landsat 5 TM (8 Julio 2003) georreferenciada dos veces con diferentes métodos, vecino más próximo y convolución cúbica, pero utilizando los mismos puntos de control. La línea de tendencia da la relación 1:1. -----	94
Figura III.6. Comparación de TM (31 Mayo 2001) con ETM+ (30 Mayo 2001) para zonas homogéneas y para cuatro diferentes tamaños de agregación. Las parcelas seleccionadas pertenecientes a un único cultivo son suelo desnudo, forestal, regadío de primavera y alfalfa. -----	97
Figura IV.1. Comparación de TM (31 Mayo 2001) con ETM+ (30 Mayo 2001) para cinco diferentes tamaños de malla: (a) Reflectividad de banda 1, B1 (B1_ETM+ vs. B1_TM); (b) NDVI (NDVI_ETM+ vs. NDVI_TM); (c) NDVI con los nuevos coeficientes de calibración de TM dados en la Tabla IV.1 (NDVI_ETM+ vs. NDVI_TMnuevos coeficientes). -----	103
Figura IV.2 Igual que para la figura III.5 (capítulo anterior) para NDVI para Landsat 7- ETM+ (NDVI_ETM+) vs IRS LISS-III 1D (NDVI_LISS III 1D). Las parcelas homogéneas seleccionadas contienen suelo desnudo, matorral, regadío de verano y alfalfa (5 Agosto 2002). -----	106

- Figura IV.3. NDVI de Landsat 7- ETM+ (NDVI_ETM+) vs. QuickBird (NDVI_Quickbird), para cuatro diferentes tamaños de malla (20 Mayo 2003). ----- 108
- Figura IV.4. NDVI de Landsat 7- ETM+ vs. QuickBird para tres diferentes tamaños de malla NDVI de Landsat (20 Mayo 2003), utilizando un procedimiento alternativo para la comparación de las imágenes. ----- 109
- Figura IV.5. NDVI de ETM+ vs. QuickBird (20 Mayo 2003, gráficas de la izquierda), ETM+ vs QuickBird (31 Julio 2003, gráficas de la derecha, los datos de TM se trasladan a ETM+ por medio de la ecuación $NDVI_{ETM+} = 1.0336 * NDVI_{TM} + 0.0128$) en zonas homogéneas con una malla de tamaño de 25 m (gráficas superiores) y 100 m (gráficas inferiores). Las parcelas homogéneas contienen suelo desnudo, forestal, regadío de primavera y alfalfa.----- 111
- Figura IV.6. Igual que la figura IV.5 para el NDVI de ETM+ vs. ASTER (20 Mayo 2003) y ETM+ vs. ASTER (9/10 Julio 2004) para tamaño de malla de 75m y 150m.----- 113
- Figura IV.7. Cambios de NDVI en imágenes de dos fechas diferentes, como se expresa con el tanto por ciento de la diferencia relativa (% Δ NDVI): en la gráfica de la izquierda se muestra para Landsat ETM+ vs. QuickBird, y en la gráfica de la derecha para TM vs. ASTER (■ L1B, □ L1A). ----- 115
- Figura IV.8. Relaciones BOA_TOA obtenidas para Landsat 5 y FORMOSAT: (a) Reflectividad en el rojo; (b) Reflectividad en el infrarrojo(c) Índice NDVI. ----- 121
- Figura IV.9. Composición color RGB 543 del 20 de Mayo de 2003 de Landsat 5- TM, sobre la cual se muestran las mallas de 1000m de las zonas 1 y 2 utilizadas en los cruces.----- 122
- Figura IV.10. Correlación de los valores de NDVI obtenidos mediante el método de normalización absoluta propuesto y el método de corrección atmosférica absoluta utilizado como referencia.----- 125
- Figura IV.11. Efecto de la corrección atmosférica en el caso del sensor ETM+ para el 20 de Mayo de 2003, para cada una de las zonas consideradas. --- 127
- Figura IV.12. Efecto de la corrección atmosférica sobre el NDVI, $NDVI_{TM_{BOA}}$, respecto al valor en el techo de la atmósfera $NDVI_{TM_{TOA}}$,

para imágenes del sensor TM adquiridas el 6 de Marzo y el 29 de Agosto de 2008, considerando dos zonas con orografía y vegetación diferentes. ----	128
Figura IV.13. Efecto de la corrección atmosférica sobre el NDVI, $NDVI_{MODIS_{BOA}}$, respecto al valor en el techo de la atmósfera $NDVI_{MODIS_{TOA}}$, para imágenes del sensor MODIS adquiridas el 6 de Marzo y el 29 de Agosto de 2008, considerando dos zonas con orografía y vegetación diferentes.-----	129
Figura IV.14. Efecto de la corrección atmosférica sobre el NDVI, respecto al valor en el techo de la atmósfera, para imágenes de los sensores TM y MODIS adquiridas el 6 de Marzo y el 29 de Agosto de 2008, pero uniendo en este caso las zonas 1 y 2. -----	130
Figura IV.15. Comparación del $NDVI_{ETM+_{BOA}}$ con el $NDVI_{ETM+_{NORMALIZADO}}$ (20 Mayo 2003), en ambas zonas. -----	131
Figura IV.16. Comparación del $NDVI_{MODIS}$ (BOA) con el $NDVI_{ETM+}$ corregido mediante una normalización de zonas invariantes (20 Mayo 2003), en ambas zonas y para la malla de 1000 m x 1000 m. -----	132
Figura IV.17. Comparación del NDVI de MODIS con el de TM, ambas sin corregir atmosféricamente, para la malla de 1000 m y para las fechas del 6 de Marzo y 29 de Agosto de 2008 .-----	133
Figura V.1. Comparación de FORMOSAT y Landsat 5- TM de (a) Reflectividad TOA en el rojo; (b) Reflectividad TOA en el infrarrojo y (c) NDVI TOA, para las 2 fechas disponible de este par de sensores.-----	141
Figura V.2. Comparación de DEIMOS y FORMOSAT de (a) Reflectividad TOA en el rojo; (b) Reflectividad TOA en el infrarrojo y (c) NDVI TOA, para la fecha del 11 de Febrero de 2010. -----	143
Figura V.3. Comparación de DEIMOS y Landsat 7 de (a) Reflectividad TOA en el rojo; (b) Reflectividad TOA en el infrarrojo y (c) NDVI TOA, para las fechas del 16 y 17 de Mayo de este par de sensores. -----	145
Figura V.4. Captura de pantalla de la herramienta Spider. Sobre una composición RGB realizada con Landsat 5, se ha obtenido la evolución fenológica en un pivot de maíz a través de los valores de NDVI, donde disponemos de imágenes del año 2010 de los sensores DEIMOS-1, Landsat 5- TM y FORMOSAT 2. -----	150

Figura V.5. Evolución temporal del NDVI en diferentes cubiertas vegetales, a partir de los sensores DEIMOS- DMC, Landsat 5 y FORMOSAT-2. (Herramienta Spider, proyecto PLEIADeS).----- 155

Figura V.6. Seguimiento del NDVI en una parcela de regadío de primavera. En la gráfica superior se muestra la evolución de FORMOSAT interpolando los datos existentes para todos los días del año, junto con los datos existentes de DEIMOS. En la inferior se muestran junto a los datos de Landsat.----- 157

Figura V.7. Seguimiento del NDVI en una parcela de regadío de verano. En la gráfica superior se muestra la evolución de FORMOSAT interpolando los datos existentes para todos los días del año, junto con los datos existentes de DEIMOS. En la inferior se muestran junto a los datos de Landsat.--- 158

Figura V.8. Comparación del NDVI en una parcela de regadío de primavera, en las fechas coincidentes entre los sensores DEIMOS y FORMOSAT y Landsat y FORMOSAT. ----- 159

Figura V.9. Comparación del NDVI en una parcela de regadío de verano, en las fechas coincidentes entre los sensores DEIMOS y FORMOSAT y Landsat y FORMOSAT. ----- 160

Índices

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Características de los satélites utilizados en nuestra constelación. VIS: visible; NIR: infrarrojo cercano. -----	30
Tabla I.2. Clases de cultivos dominantes en el área de estudio, el tamaño típico de parcela y el rango de NDVI de cada uno de ellos -----	35
Tabla II.1. Características de los satélites utilizados en nuestra constelación virtual. PAN: Pancromática; VIS: visible; NIR: infrarrojo cercano; SWIR: infrarrojo medio; TIR: infrarrojo térmico.-----	42
Tabla II.2. Rango espectral, rangos de post- calibración (parámetros de escalado L_{MIN_λ} y L_{MAX_λ} y los correspondientes factores de reescalado, ganancia $[G_{rescale}]$ y sesgo $[B_{rescale}]$), así como la irradiancia solar extraterrestre ($ESUN_\lambda$), para Landsat5 TM.-----	48
Tabla II.3. Rango espectral, rangos de post- calibración (parámetros de escalado L_{MIN_λ} y L_{MAX_λ} y los correspondientes factores de reescalado, ganancia $[G_{rescale}]$ y sesgo $[B_{rescale}]$), así como la irradiancia solar extraterrestre ($ESUN_\lambda$), para Landsat7 ETM+.-----	49
Tabla II.4. Coeficientes de calibración e irradiancia solar extraterrestre para cada banda espectral i , para LISS-III 1D, QuickBird y ASTER. -----	50
Tabla II.5. Rango espectral y los correspondientes factores de reescalado, ganancia $[G_{rescale}]$ y sesgo $[B_{rescale}]$), para DEIMOS. -----	51
Tabla II.6. Latitud geográfica (ϕ), declinación (δ), ángulo solar cenital solar (θ) y k (factor de corrección debido a la excentricidad de la órbita terrestre, en función del día del año) para las imágenes de la tabla III.1.-----	53
Tabla III.1.- Pares de imágenes utilizados en este trabajo, así como las fechas y horas de paso. -----	85
Tabla III.2. Ecuaciones lineales para las reflectividades y NDVI procedentes de TM vs. ETM+ (representados por V_{TM} y V_{ETM+}), para zonas homogéneas y para el tamaño de agregación de 100 m x 100 m. -----	96
Tabla IV.1. Ecuaciones lineales para las reflectividades (bandas 3, 4 y 5) y NDVI procedentes de TM vs. ETM+ (representados por V_{TM} y V_{ETM+}). Se	

han usando los coeficientes de calibrado para TM mostrados en la tabla II.2) y para cinco diferentes tamaños de agregación.-----102

Tabla IV.2. Mismos valores que en la tabla III.2 (capítulo anterior) para las reflectividades y NDVI procedentes de LISS- III 1 D vs. ETM+, para la zona completa (sin índice) y para zonas homogéneas (índice: hom).-----107

Tabla IV.3. Coeficientes de la ecuación lineal del NDVI procedentes de ETM+ vs. LISS-III 1D y ETM+ vs. TM (con los nuevos coeficientes de calibración) sobre zonas homogéneas (tamaño de agregación 100 m x 100 m) y los obtenidos por Steven et al. (2003).-----107

Tabla IV.4. Mismos valores que en la tabla IV.3 para ETM+ vs. QuickBird en dos fechas diferentes. Los datos de TM del 31 de Julio de 2003 son trasladados a ETM+ por medio de la ecuación $NDVI_{ETM+} = 1.0336 \cdot NDVI_{TM} + 0.0128$ (Tabla IV.7). Δ = desviación del valor medio. -----108

Tabla IV.5. Mismos datos que en la tabla IV.4 para NDVI procedente de Aster vs. ETM+ (datos no disponibles de Steven et al. 2003). -----112

Tabla IV.6. Mismos valores que en la tabla IV.4 del NDVI procedente de Landsat 7- ETM+ y Landsat 5 TM (con los nuevos coeficientes de calibrado) vs. NOAA 16-AVHRR para cuatro diferentes fechas (tamaño de agregación: 5 km x 5 km; no se dispone de zonas homogéneas). σ = desviación estándar del valor medio.-----116

Tabla IV.7. Resumen de las ecuaciones de traslación entre sensores para los elementos pertenecientes a nuestra constelación de sensores.-----118

Tabla IV.8. Comparación de las reflectividades (ROJO E INFRARROJO) BOA vs. TOA para FORMOSAT, Landsat 5 y Landsat 7-----122

Tabla IV.9. Listado de fechas de las imágenes estudiadas para el sensor Landsat 5- TM. Ecuaciones de normalización obtenidas para las imágenes de Landsat 5- TM estudiadas, $NDVI_{TM \text{ normalizado}} = m \cdot NDVI_{TM_{TOA}} + b$. -----124

Tabla IV.10. Pendiente, ordenada en el origen y RMSE de la comparación de NDVI normalizado frente a NDVI_BOA-----125

Tabla V.1. Pares de sensores y fechas disponibles para la intercomparación, así como las variables comparadas en cada caso. -----139

Tabla V.2. Características de los sensores utilizados en la constelación.----- 140

Tabla V.3a. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos NDVI entre FORMOSAT y Landsat 5. ----- 142

Tabla V.3b. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos reflectividades (rojo e infrarrojo) entre FORMOSAT y Landsat 5. ----- 142

Tabla V.4a. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos NDVI entre DEIMOS y FORMOSAT.----- 144

Tabla V.4b. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos reflectividades (rojo e infrarrojo) entre DEIMOS y FORMOSAT. ----- 144

Tabla V.5a. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos NDVI entre DEIMOS y Landsat 7.----- 146

Tabla V.5b. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos reflectividades (rojo e infrarrojo) entre DEIMOS y Landsat 7. ----- 146

Tabla V.6. Tipos de usos de suelo y coordenadas del centro de las parcelas en las cuales se ha obtenido la evolución del NDVI.----- 152

Índices

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN y OBJETIVOS

I.1 Seguimiento multitemporal de la superficie terrestre.

Uno de los principales objetivos de los sistemas de satélites de observación de la Tierra, EO satélites (*Earth Observation satellites*, EO satellites) es el seguimiento de la vegetación y de sus cambios. Dependiendo de cual sea la escala de interés, la resolución espacial y temporal que proporciona un solo satélite, con frecuencia, no va a ser suficiente. Este es el caso de los cultivos agrícolas (aplicaciones agrícolas de precisión o de regadío), para los cuales la Teledetección tiene un gran potencial, como ya apuntó Jackson hace más de 20 años. Sus conclusiones acerca de la resolución espacial, frecuencia de cobertura (resolución temporal) y la disponibilidad de las imágenes, como uno de los principales requerimientos en la gestión agraria, son todavía válidos hoy en día (e.g. Moran et al. 1997; Calera et al. 2005; Osann Jochum et al. 2006; Hansen & Loveland, 2012).

Actualmente el usuario final puede recibir productos derivados de imágenes de satélite en unas cuantas horas después de la adquisición de las imágenes, incluyendo en su procesado corrección geométrica, atmosférica y control de calidad (DEMETER 2002; Calera et al. 2005; Osann Jochum et al. 2006). El actual *modus operandi* de NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) permite el acceso en tiempo real a imágenes gratuitas de imágenes de Landsat 7-

ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) y Landsat 8 de todo el planeta a través del USGS (*U.S. Geological Survey*) vía portal GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov/>). De forma similar, la mayor parte de operadores de satélites comerciales, como la compañía española DEIMOS han permitido superar una de las condiciones críticas, que es la de la accesibilidad a las imágenes en tiempo real. El pasar de las 4- 6 semanas de tiempo de envío de las imágenes a los usuarios como apuntaba Jackson (1984) a unas pocas horas, ha requerido el paso de treinta años y un inmenso salto tecnológico en las comunicaciones y poder de computación.

La gestión agraria requiere además, el seguimiento de los cultivos agrícolas mediante cobertura de alta resolución espacial y alta frecuencia temporal durante el periodo de crecimiento del cultivo (Calera et al, 2005). La resolución espacial necesaria es suministrada por sensores de alta resolución espacial (tamaño de píxel entre 20- 30 m), como son Landsat 5- TM (*Thematic Mapper*), Landsat 7- ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), DEIMOS, SPOT4- VEGETATION (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), IRS 1C/D LISS-III (*Infrared-Multispectral Scanner- Linear Imaging Self-Scanning System*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), ALI (*Advanced Land Imager*). Sin embargo la resolución espacial que proporcionan estos sensores es insuficiente para resolver parcelas de tamaño inferior a 1 ha (aproximadamente 3x3 píxel) en el seguimiento temporal. El tamaño ideal para la mayor parte de las aplicaciones agrarias podría situarse alrededor de 10 m, como proporciona SPOT5, RapidEye (5m) y para los sensores previstos a bordo de Sentinel- 2. Sensores de muy alta resolución espacial, alrededor de 1 m, como QuickBird, IKONOS, GeoEye-1, Worldview- 1, Pléiades permiten la convergencia de la teledetección con la fotogrametría clásica.

Sensores de media resolución espacial como NOAA-AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) y MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) proporcionan imágenes diarias con el objetivo de proveer coberturas globales, aunque su resolución espacial media, entre 250 m y 1 km en el nadir, les hacen poco adecuados para el seguimiento de cultivos que crecen en parcelas cuyo tamaño es muy variable, y desde luego por debajo de las 100 ha necesarias para el seguimiento con MODIS. En zonas de cultivos extensivos como es la Mancha utilizada en este trabajo, el tamaño medio se sitúa alrededor de las 4 ha, en un rango que va de 1 ha hasta las 70 ha. Otras zonas típicas agrícolas presentan aún mayor fragmentación que la indicada.

Sin embargo, la arquitectura de la cubierta vegetal y los parámetros biofísicos que la describen, como el área de índice foliar, fracción de cubierta vegetal, biomasa, evapotranspiración, estrés de agua, evolucionan durante todo el periodo de crecimiento del cultivo. Por tanto un único satélite con adquisición de imágenes cada 16 días (como es Landsat), va a proveer poca información útil, considerando también que las condiciones meteorológicas pueden incrementar el periodo de tiempo entre las imágenes utilizables. El requerimiento de frecuencia de cobertura unido al de alta resolución espacial todavía no ha sido satisfecho después de más de 30 años desde el lanzamiento de la misión Landsat. Diferentes constelaciones de satélites han sido propuestas con este objetivo en varios estudios (Moreno et al. 2002) y de hecho la propuesta de Sentinel-2 cuyo lanzamiento se prevee en 2014, va en dirección de una constelación de dos satélites, pero todavía no existe una solución práctica para un futuro cercano.

I.2 Constelación multisensor

A los efectos de este trabajo se define la constelación multisensor como un conjunto de satélites de observación de la Tierra, actualmente en órbita, o que se preveen en un futuro próximo, que satisfacen los requerimientos de resolución espacial para una aplicación dada y que permitirían ser usados en forma conjunta para generar una serie multitemporal, que describa adecuadamente la evolución de la cubierta. Como este trabajo se orienta al seguimiento de la dinámica de la cubierta vegetal de cultivos, el tamaño de las parcelas con cubiertas correspondientes a un único cultivo establecería la resolución espacial necesaria. Dado que ese tamaño se encuentra alrededor de la hectárea, la resolución espacial adecuada podría situarse entre los 5 m de RapidEye y los 30 m de Landsat. La resolución de 30 m podría resolver parcelas de alrededor de 1 ha (Martínez Beltrán, 1999).

1.2.1 Intercomparación entre sensores

Un requisito básico de una constelación sería que las observaciones desde los diferentes sensores que la integren sean comparables entre sí. Diversos estudios han tenido como objetivo la obtención de relaciones entre sensores (Steven et al. 2003; Röder et al. 2005; Miura et al. 2006; Teillet et al. 2006; Van Leeuwen et al. 2006). Estos autores se han centrado en diferentes aspectos con el fin de obtener imágenes multi- resolución, tanto espacial como temporal, para el análisis de los parámetros biofísicos.

El trabajo de Steven et al, (2003), es una referencia en la comparación entre sensores. Su estudio se basa en simular las respuestas de las bandas espectrales de los diferentes satélites a partir de datos de reflectividad del suelo. La ventaja frente a la comparación de los datos procedentes de imágenes de diferentes sensores es que los resultados no se ven afectados por errores de calibración o interacciones con la atmósfera y que la simulación puede realizarse con cualquier combinación de sensores. La linealidad y estabilidad que este autor encuentra para las relaciones entre sensores en las simulaciones realizadas, pueden ser alteradas por múltiples causas ligadas a las observaciones reales, como ha sido señalado por otros autores (Huete et al, 2002). Entre ellas se destacan:

- Impacto de las condiciones atmosféricas en las observaciones. Una corrección atmosférica precisa de las imágenes es uno de los principales objetivos debido a la usual falta de datos atmosféricos adecuados (vapor de agua y aerosoles, principalmente) en diferentes sitios.
- Diferentes ángulos de iluminación solar y de visión los cuales causan efectos bi-direccionales, normalmente descritos a través de la función de distribución de reflectividad bi- direccional (*Bi-directional Reflectance Distribution Function*, BRDF).
- Diferencias en las bandas espectrales, como son el ancho de banda y las respuestas de las diferentes bandas espectrales, que interactúan también con las condiciones atmosféricas.
- Efectos de georreferenciación, debido a la incertidumbre en la corrección geométrica de las imágenes. Al comparar imágenes procedentes de diferentes sensores y con diferente resolución espacial, se requiere que sea la misma superficie la que se está observando a través de toda la secuencia temporal de imágenes.
- Diferencias de resolución espacial, y por tanto del tamaño de pixel, que requiere de técnicas de agregación tanto para comparar reflectividades como otros parámetros como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) y otros.

La mayoría de los trabajos de intercomparación están dirigidos hacia una investigación metodológica. En este trabajo, además de abordar también algunos de los aspectos metodológicos anteriormente señalados, se da un paso más allá en lo que se refiere a aplicaciones operacionales, esto es, se pretende operar con una constelación multisensor y evaluar su desempeño a través de varias

campañas. Ello requiere comparar observaciones realizadas desde diferentes sensores a lo largo del tiempo. Para ello utilizaremos las series temporales de imágenes procedentes de los proyectos DEMETER (*DEMONstration of Earth observation TEchnologies for Routine irrigation advisory services*), PLEIADeS (*Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support*) y SIRIUS (*Sustainable Irrigation water management and River-basin Governance*), como un ejemplo de demostración (Calera et al. 2005; Osann Jochum et al. 2006).

En la Tabla II.1 se muestran los sensores que integrarían la constelación y sus características. Landsat es la columna principal, debido a su excelente disponibilidad operacional y a que NASA ha puesto todo el archivo Landsat a libre disposición a través del servidor web (<http://glovis.usgs.gov/>), como anteriormente se ha mencionado. Los datos procedentes de Landsat constituyen el más amplio archivo de los datos de observación de la Tierra con una resolución espacial de 30 m. Consecuentemente, los métodos actuales para el seguimiento de la cubierta terrestre que usan imágenes de resolución espacial media (10- 50m), emplean normalmente imágenes de Landsat (Hansen and Loveland, 2012). Los resultados mostrados por Kovalskyy and Roy (2013) indican la utilidad de combinar los datos procedentes de Landsat 5 TM y Landsat 7- ETM+ para así obtener las ventajas de sus diferentes adquisiciones y mitigar el deterioro de Landsat 7- ETM+ en 2003.

Incluso en el caso de tener en el futuro una constelación de satélites con un mismo sensor, como sería el caso de Sentinel-2, en la que están previstos dos satélites que portarían el mismo instrumento, varios de los problemas tales como cambios en el ángulo de observación, atmósfera...que habría que resolver para combinar las observaciones a lo largo de una serie temporal, serían semejantes a los que presentaría una constelación multisensor. Por otro lado los sensores de baja o moderada resolución espacial, pero de alta frecuencia temporal, proporcionan la posibilidad de complementar a las series temporales de alta resolución. Por ello también se han incluido en este trabajo a la hora de intercomparar las observaciones el sensor AVHRR y el sensor MODIS.

Tabla I.1. Características de los satélites utilizados en nuestra constelación. VIS: visible; NIR: infrarrojo cercano.

<i>Satélite-sensor</i>	<i>Ciclo</i>	<i>Tamaño (km x km)</i>	<i>Bandas / Cobertura espectral (μm)</i>	<i>Resolución espacial en el nadir (m)</i>
QuickBird	3- 7 días	16.5 x 16.5	VIS (Banda1) / 0.45- 0.52 VIS (Banda2) / 0.52- 0.60 VIS (Banda3) / 0.63- 0.69 NIR (Banda4) / 0.76- 0.90	2.44
FORMOSAT-2	Diaria	24 x 24	VIS (Banda1) / 0.45- 0.52 VIS (Banda2) / 0.52- 0.60 VIS (Banda3) / 0.63- 0.69 NIR (Banda4) / 0.76- 0.90	8
Terra- ASTER	16 días	60 x 75	VIS (Banda1) / 0.42- 0.60 VIS (Banda2) / 0.63- 0.69 NIR (Banda3) / 0.76- 0.86	15
DEIMOS 1- DMC DEIMOS – UKDMC2	2- 3 días	600 x 1000	VIS (Banda1) / 0.52- 0.60 VIS (Banda2) / 0.63- 0.69 NIR (Banda3) / 0.77- 0.90	22
IRS LISS III- 1D	24 días	140 x 140	VIS (Banda2) / 0.52- 0.59 VIS (Banda3) / 0.62- 0.68 NIR (Banda4) / 0.77- 0.86	23
Landsat 7- ETM+	16 días	170 x 183	VIS (Banda1) / 0.45- 0.52 VIS (Banda2) / 0.52- 0.60 VIS (Banda3) / 0.63- 0.69 NIR (Banda4) / 0.76- 0.90	30
Landsat 5- TM	16 días	172 x 185	VIS (Banda1) / 0.45- 0.52 VIS (Banda2) / 0.53- 0.61 VIS (Banda3) / 0.63- 0.69 NIR (Banda4) / 0.78- 0.90	30
Terra- MODIS	Diaria	3000 x 3000	VIS (Banda1) / 0.62- 0.67 NIR (Banda2) / 0.84- 0.88	250
NOAA 16- AVHRR	2 por día	3000 x 1500	NIR (Banda2) / 0.84- 0.88 NIR (Banda2) / 0.725- 1.00	1100

Debido a la avería sucedida en el año 2003 en el sistema de corrección del avance del sensor en Landsat 7- ETM+ (<http://landsat7.usgs.gov/updates.php>, accedido el 15-10-12) todas las imágenes recibidas después de 31 Mayo de 2003 no son utilizables en una parte importante de cada imagen.

Los píxeles que faltan en las imágenes de Landsat 7 asociados a dicha avería, degradan la utilidad de las imágenes, sin embargo la mayoría de los científicos concluyen que los datos siguen siendo absolutamente útiles para su uso particular. Además, el desarrollo de nuevas herramientas, como es crear un mosaico de imágenes para rellenar los píxeles que faltan en la imagen, permiten un uso más científico de los datos. Incluso con este fallo producido en Landsat 7, los datos de ese sensor todavía son preferidos frente a otras alternativas más costosas (NASA, 2003). Por otro lado, después de una excepcional larga vida útil, Landsat5-TM fue puesto fuera de servicio a finales de 2011.

El fallo producido en Landsat7 demuestra claramente la vulnerabilidad del segmento espacio en su aspecto operacional para esta y para similares aplicaciones. Actualmente están disponibles plataformas alternativas como DEIMOS, que aunque ofrece una revisita prácticamente semanal, presenta el inconveniente de su carácter comercial, y por tanto tiene un coste mayor. Otras opciones tienen un tiempo de revisita más largo lo que les hace menos adecuadas para este tipo de aplicaciones, (IRS, ALI, SPOT); algunos de ellos como SPOT presentan cambios notables en los ángulos de observación en la adquisición de imágenes en la serie multitemporal.

Recientemente han surgido un número de plataformas que pueden añadir más elementos a nuestra constelación de sensores. Recientemente, el 11 de Febrero de 2013, se ha lanzado el sensor Landsat 8 (30 m), por parte de NASA, de gran interés en relación con este trabajo (<http://ldcm.nasa.gov>, accedido el 11-02-13). La misión LDCM (*The Landsat Data Continuity Mission*) es el futuro de los satélites de Landsat, que continuará con la obtención de datos e imágenes para ser usados en Agricultura, Educación, Ciencia...

Landsat 8 lleva a bordo 2 sensores, el sensor OLI (*Operational Land Imager*) y el sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). El sensor OLI obtiene imágenes con 9 bandas espectrales con un swath de 185 km y con una resolución espacial de 30 m para todas las bandas excepto para la pancromática que es de 15 m. El TIRS, obtiene imágenes en 2 bandas térmicas con una resolución de 100 m y con un swath de 185 km.

Ambos sensores ofrecen un avance técnico sobre los anteriores sensores de Landsat. Los sensores OLI y TIRS registran los datos de manera simultánea que son procesados al nivel 1. Posteriormente datos calibrados y ortorectificados están disponibles para su distribución (Irons et al, 2012) (Markham and Helder, 2012) (Roy et al., 2014).

De similares características es el caso de Sentinel- 2 (10- 20m), una misión óptica de resolución espacial media del programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), actualmente COPERNICUS, una iniciativa de ESA (*European Space Agency*).

Sentinel-2A será lanzado en 2014/15, seguido de Sentinel-2B. Ambos darán vueltas a la Tierra en una órbita polar a una altitud de unos 780 km. (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2, accedido el 24-04-14) (<http://www.astrium.eads.net>, accedido el 24-04-14). El par de satélites de Sentinel- 2, proporcionará de forma rutinaria imágenes ópticas de alta resolución, proporcionando una continuación mejorada de los datos tipo Landsat y SPOT(<http://www.esa.int>, accedido el 04-05-2012).

La misión Sentinel-2 ofrecerá una combinación de la cobertura global sistemática de la superficie terrestre, una revisita de cinco días en el ecuador bajo mismas condiciones de observación, alta resolución espacial (es decir del tipo de Landsat) y un amplio campo de visión para observaciones multispectrales con 13 bandas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del espectro electromagnético.

A estos satélites se une la constelación de Pléiades en la escala de muy alta resolución espacial (0,5- 2m). Han sido construidos por la compañía ASTRIUM, para la agencia espacial francesa CNES, responden a las necesidades y a los nuevos desafíos civiles y militares. Con Pléiades 1A en órbita y el lanzamiento de Pléiades 1B en diciembre de 2012, la constelación Pléiades suministra productos ópticos en muy alta resolución, con una capacidad de revisita diaria sobre cualquier punto del planeta (<http://smc.cnes.fr/PLEIADES/>, accedido el 24-04-14).

También previsto para el año 2015/16 el lanzamiento del primer satélite óptico español de observación de la Tierra, SeoSat/INGENIO (*Scientific Earth Observation Satellite*). El satélite de observación terrestre INGENIO, es financiado por el Gobierno Español y la Agencia Espacial Europea (ESA). Esta misión

suministrará imágenes de tierra de alta definición, pancromáticas (resolución espacial: 2, 5 m) y multiespectrales (resolución espacial: 10 m) para varias aplicaciones que pueden utilizarse en cartografía, seguimiento de cambios en el terreno, planificación urbana, agricultura, gestión de aguas, seguimiento del medio ambiente y gestión de riesgos.

I.3 Zona de estudio

La zona de aplicación de la metodología desarrollada en este trabajo se localiza en el sureste español, en la denominada zona 1 de la Figura I.1. El uso del suelo mayoritario en nuestra área de estudio es la agricultura. Existen en la actualidad cerca de 100 000 ha de cultivos en regadío y más del 95% de estos, utilizan agua procedente de sondeos (Calera et al., 2011). La práctica agrícola mayoritaria son los cultivos en régimen de secano (cereal y viñedo principalmente) y los barbechos. La vegetación natural ha sido excluida a las áreas menos productivas para la agricultura, con suelos menos desarrollados y mayores pendientes.

Por tanto, el paisaje de la zona de estudio se caracteriza por una fuerte heterogeneidad, con un amplio rango de tipos de uso de suelo, desde suelo desnudo hasta vegetación densa, cubriendo una gran variabilidad de cultivos, vegetación natural y suelos. El tamaño típico de las parcelas con un cultivo homogéneo está alrededor de 4 ha, con muchas de ellas por encima de 10 ha. Sobre esta zona de estudio se ha dispuesto anualmente de una clasificación de usos de suelo a partir de imágenes de satélite mediante la clasificación multitemporal supervisada con intenso trabajo de campo para su validación (Calera 2000; Martínez Beltrán and Calera Belmonte 2001). Las clases de cultivos más relevantes se muestran en la tabla I.2.

El análisis de la constelación multisensor se ha realizado aplicando la metodología que se presenta en este trabajo en una superficie amplia perteneciente a la zona indicada. También, con el fin de comprobar cómo funciona nuestra metodología en diferentes zonas y para comparar los diferentes métodos de corrección atmosférica aplicados, se han elegido dos zonas de estudio diferentes para comparar los resultados.

Cada una de estas zonas cubre una superficie de 1225 km², siendo la coordenada superior izquierda de la zona 1 (568546, 4337107) y la coordenada

superior izquierda de la zona 2 (541522, 4302176). La zona 1 es una zona donde hay una gran variedad de clases de usos de suelo, predominando cultivos agrícolas, con cubiertas que van desde suelo desnudo hasta vegetación densa, con una fracción importante de cultivos de regadío. En la zona 2, predomina la vegetación natural, con importantes zonas boscosas presentando una orografía más compleja. Ambas zonas se muestran en la figura I.1

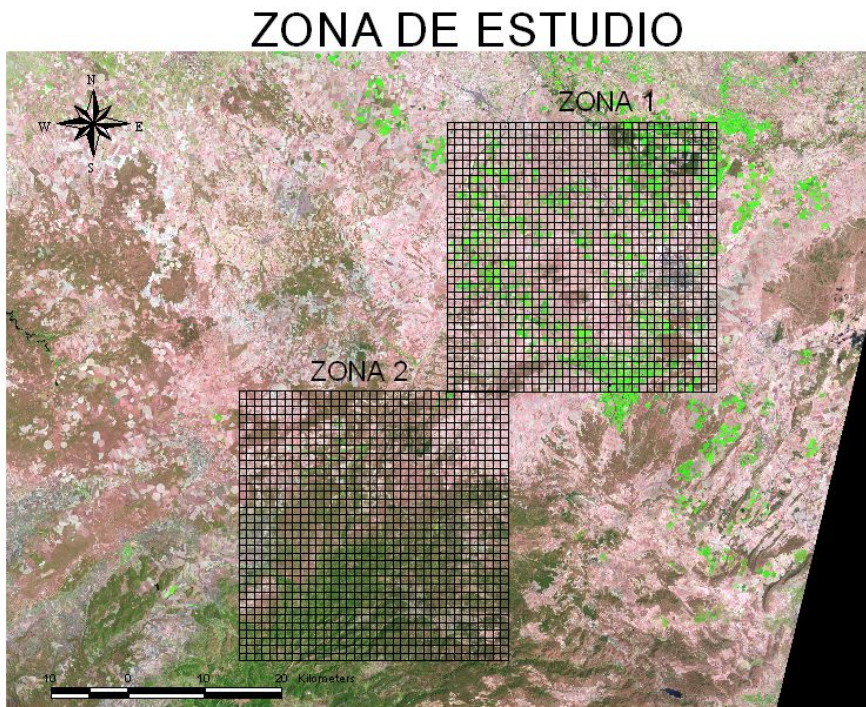


Figura I.1. Composición color RGB 543 del 20 de Mayo de 2003 de Landsat 5-TM, sobre la cual se muestran las mallas de 1000m de las zonas 1 y 2 utilizadas en la aplicación de la metodología.

Tabla I.2. Clases de cultivos dominantes en el área de estudio, el tamaño típico de parcela y el rango de NDVI de cada uno de ellos

<i>Clases de cultivos</i>	<i>Cultivos/ usos de suelo</i>	<i>Tamaño típico de parcela (ha)</i>	<i>Rango de NDVI (durante periodo de crecimiento)</i>
Cereales de secano	Cebada, trigo, lenteja...	4 -10	0.16 - 0.65
Cereales de regadío de primavera	Cebada, trigo, colza, guisante, ajo...	4 -10	0.16 - 0.91
Cereales de regadío de verano	Maíz, remolacha, cebolla, girasol...	4 -10	0.16 - 0.86
	Viña de regadío	4 -10	0.16 - 0.35
Cultivos de secano de verano	Girasol de secano y viña	1 -5	0.16 - 0.30
Forestal y matorral	Arbusto, matorral...	1	0.2 (arbusto escaso) 0.50 (bosque denso)
Leguminosa perenne	Alfalfa	4 -10	0.40 (corte) - 0.91
Suelo desnudo	Suelo desnudo, barbecho	1 -10	0.14 - 0.18

I.4 Objetivos de la Tesis

El objetivo general de este trabajo es construir de forma operacional una constelación multisensor para realizar el seguimiento de la cubierta vegetal mediante los parámetros biofísicos que describen el desarrollo y crecimiento de la vegetación.

En dicha constelación se ensamblan sensores en órbita que satisfacen la resolución espacial necesaria para el seguimiento de la vegetación debida a los cultivos agrícolas en la zona de estudio. Para ello se ha desarrollado una metodología para la comparación de observaciones desde diferentes sensores, que permite establecer las ecuaciones que relacionan unas observaciones con otras, en lo que se refiere a reflectividades e índices de vegetación espectrales.

Para ello se consideran los siguientes objetivos parciales:

1.- Aplicar una metodología para comparar reflectividades y NDVI a partir de observaciones reales de imágenes sincrónicas o cuasi- sincrónicas de sensores de

diferente resolución y en varias escalas de observación, mediante la agregación de los datos.

2.- Examinar los efectos derivados de la incertidumbre en la corrección geométrica en sensores con diferentes escalas de observación y utilizando diferentes métodos de georreferenciación.

3.- Analizar el efecto multiescala en la obtención del NDVI y la influencia de la escala de observación.

4.- Obtener las ecuaciones que nos permitan la traslación de un sensor a otro, con el fin de obtener una serie multitemporal y multiescalar consistente.

5.- Comprobar la estabilidad temporal en las ecuaciones lineales encontradas entre los diversos sensores.

6.- Analizar el efecto de la corrección atmosférica para algunos de los pares de sensores analizados, frente al proceso de normalización por zonas invariantes aplicado a una serie de imágenes.

7.- Obtener, mediante el NDVI, una secuencia temporal de imágenes para describir la evolución temporal de los diferentes usos de suelo presentes en el área de estudio.

I.5 Estructura de la memoria

En el **Capítulo II**, se hace una descripción de las características de los diferentes sensores que vamos a utilizar en nuestra constelación multisensor, así como una descripción detallada del procesamiento básico en cadena de las imágenes utilizadas, con el objetivo de establecer un procedimiento operativo.

En el **Capítulo III**, se describe la metodología que proponemos para la comparación entre observaciones procedentes de sensores con diferentes características, a diferentes escalas y en diferentes plataformas, los cuales ofrecen muchas oportunidades para el seguimiento de cambios producidos en el ecosistema. La utilización de datos procedentes de diferentes satélites, requiere una intercalibración entre sensores.

En el **Capítulo IV** se muestran los resultados de la metodología desarrollada en el capítulo III, de nuestra comparación entre las diferentes observaciones. En

este capítulo se integran valores de reflectividad y de NDVI procedentes de varios satélites multiescala aplicando para ello un modelo lineal, obteniendo las ecuaciones que nos permitan la traslación de un sensor a otro, con el fin de obtener una serie multitemporal y multiescalar consistente. El sistema completo de sensores puede considerarse como "una constelación multisensor".

En todas las comparaciones realizadas, ETM+ se define como el sensor de referencia. Las imágenes de TM se trasladan a ETM+ por medio de las relaciones entre sensores derivadas anteriormente, por lo que estos dos sensores pueden intercambiarse. Las otras comparaciones que vamos a realizar son con LISS-III 1C, QuickBird, Terra- ASTER, Terra- MODIS, FORMOSAT-2, DEIMOS 1- DMC y DEIMOS- UKDMC2.

En el caso de la comparación Landsat- MODIS y Landsat- FORMOSAT, se utilizarán datos procedentes de ambos sensores, cuando ambos han sido corregidos atmosféricamente, como cuando son datos obtenidos en el techo de la atmosfera.

En el **Capítulo V**, se muestran los resultados de la comparación entre una serie de satélites de alta resolución espacial y alta frecuencia temporal como Landsat 7, Landsat 5, DEIMOS y FORMOSAT para el seguimiento de la evolución temporal de los cultivos y vegetación natural durante su periodo de crecimiento, que supone una herramienta de gran valor para una correcta gestión en espacios naturales y áreas agrícolas.

En la figura 1.2 se indica el flujo de trabajo aplicado a las imágenes disponibles de los diferentes sensores para la obtención de una serie consistente de imágenes multitemporal y multiescala.

En el **Capítulo VI**, se comentan una serie de conclusiones a las que se han llegado a partir de cada uno de los objetivos propuestos inicialmente. También se estudian nuevas perspectivas ya que la evaluación de la metodología de trabajo propuesta en esta tesis también va a permitir su uso en proyectos posteriores.

También se presenta una revisión de los próximos lanzamientos de satélites. Todos estos sensores tienen diferente resolución espacial, diferentes anchos de banda y respuesta espectral. Su utilización conjunta, operando como una constelación multisensor que permita densificar las observaciones de la superficie terrestre, es el objetivo central de este trabajo.

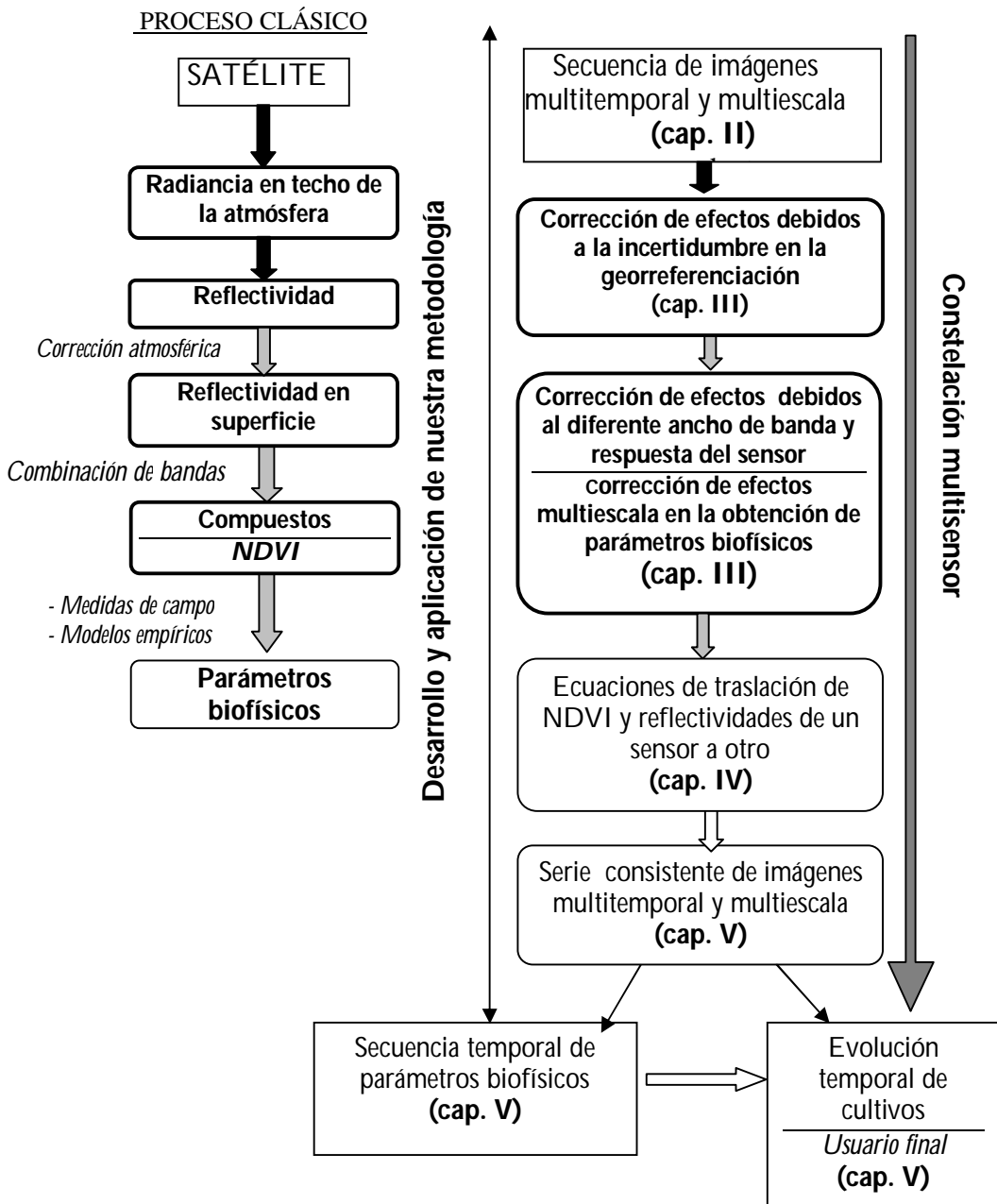


Figura I.2. Proceso de trabajo aplicado a las imágenes disponibles de los diferentes sensores para la obtención de una serie consistente de imágenes multitemporal y multiespacial.

CAPÍTULO II : MÉTODOS UTILIZADOS Y PROCESADO DE IMÁGENES.

Un objetivo básico del procesamiento de imágenes multitemporales es permitir el seguimiento a lo largo del tiempo de las cubiertas vegetales, de tal forma que la respuesta de la vegetación registrada en las imágenes sea la correspondiente a dicha cubierta, aislándola de la de otros factores atribuibles a cambios en el sensor, a cambios los ángulos de iluminación solar y visión y a cambios en la atmósfera (Martínez-Beltrán et al., 2009).

En este trabajo se van a utilizar una serie de sensores con diferentes bandas espectrales, en las que el procesado básico de correcciones geométricas y radiométricas de imágenes individuales está bien establecido. Sin embargo, la corrección atmosférica es uno de los retos para el uso de la serie temporal para un solo sensor. Más todavía cuando se pretende utilizar una constelación de sensores para análisis multitemporales. En este caso, es imprescindible la corrección de efectos de iluminación y de la atmósfera sobre la señal adquirida con el fin de obtener imágenes de reflectividad en superficie independientes de estos factores y que nos permitan extraer información de forma cuantitativa (Amorós- López et al, 2009).

La corrección atmosférica se puede llevar a cabo por diferentes caminos : (a) por un lado aquellos procedimientos basados en modelos de transferencia radiativa, que requieren conocimiento detallado de la atmósfera (b) por

resolución iterativa de ecuaciones de transferencia radiativa utilizando información desde la imagen, de varios píxeles con diferentes grados de cobertura vegetal (Guanter et al, 2007) (c) modelos basados en superficies invariantes, basados en la cuasi-invarianza de las reflectividades (Vries et al, 2007; Hadjimitsis et al, 2009; Chander et al, 2010) (d) modelos simplificados en que el efecto de la atmósfera se cuantifica por el valor de la radiancia en zonas “oscuras”, desarrollado por Chavez (1996), asumido como procedimiento operativo por el Plan Nacional de Teledetección, (Chuvieco y Hantson, 2010), (e) recurriendo a calibración vicaria con medidas en tierra en el momento de paso del satélite (Vries et al, 2007).

Este capítulo describe las imágenes utilizadas en este trabajo y su procesado básico, con el objetivo de establecer un procedimiento operativo. Inicialmente se hace una descripción de los diferentes sensores que vamos a utilizar y de las correcciones a seguir en el procesamiento básico de las imágenes. Se presta especial interés a la descripción de la corrección atmosférica absoluta y relativa, dada su relevancia en capítulos posteriores. Por último se explora un procedimiento de normalización del NDVI, que suele ser un producto básico, utilizando el concepto de invarianza de dos tipos de superficie: suelo desnudo y vegetación densa, y que se aplicará posteriormente, cap. V, a la secuencia de imágenes.

El objetivo último es disponer de un procedimiento que permita el seguimiento de la evolución temporal de la cubierta vegetal utilizando para ello una constelación de satélites formada por diferentes sensores, que podríamos denominar constelación multisensor. Estos sensores pueden tener diferentes anchos de banda y diferente resolución espacial.

II.1 Procesado básico de imágenes

El proceso básico de las imágenes consiste en la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica. Las imágenes utilizadas han sido geométrica, radiométrica y atmosféricamente corregidas por el IDR-UCLM (en el caso de Landsat 5 TM, Landsat 7- ETM+ y DEIMOS) y por CESBIO de Toulouse, en el marco del proyecto VEN μ S (FORMOSAT-2), para obtener reflectividades en el techo de la atmósfera (*Top Of Atmosphere*, TOA) y en la superficie (*Bottom Of Atmosphere*, BOA). En el caso de las imágenes de MODIS, las reflectividades diarias Version 5 (MOD09GQ) obtenidas en la proyección sinusoidal y atmosféricamente corregidas, son distribuidas por el LP DAAC (*Land Processes*

Distributed Active Archive Center). También hemos trabajado con imágenes de reflectividad diaria de MODIS en el techo de la atmósfera Versión 2 (MOD02QKM) distribuidas por la Unidad de Cambio Global del Image Processing Laboratory de la Universitat de València.

Una vez aplicado el procesamiento básico a las distintas imágenes, se ha calculado el NDVI para cada sensor, utilizando las correspondientes bandas en el rojo y en el infrarrojo cercano, para su posterior agregación espacial a una determinada malla y comparación entre sensores. Estos últimos pasos se describirán en detalle en los capítulos III- V. El procesamiento aplicado a las imágenes se muestra en la figura II.1.

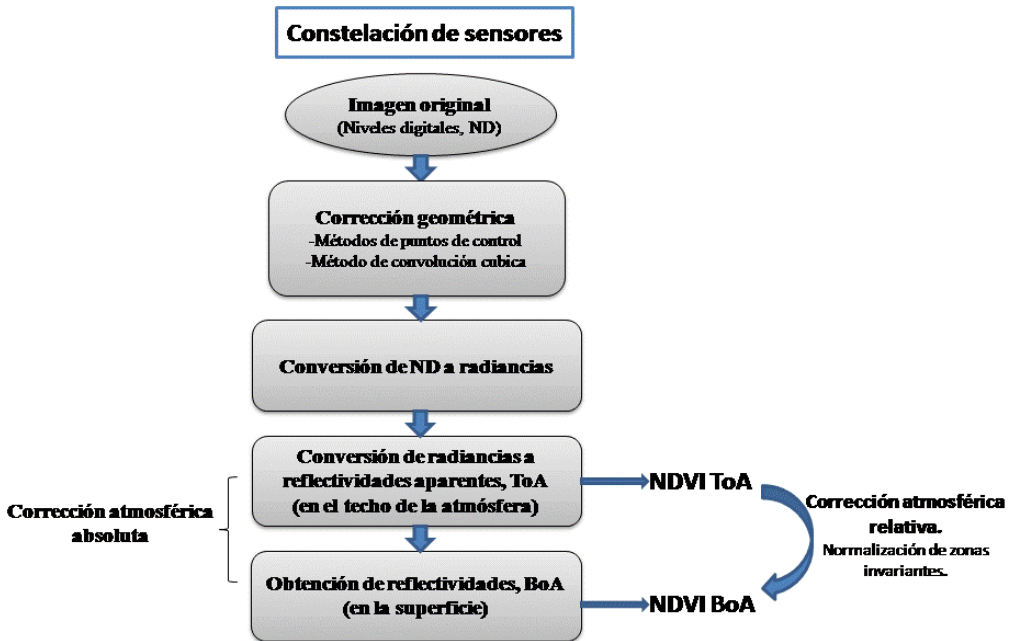



Figura II.1. Diagrama de flujo de los pasos llevados a cabo para el procesado de las imágenes, previamente a la agregación y a la comparación entre sensores.

II.2 Imágenes utilizadas. Descripción y características de los sensores

La tabla II.1 suministra información acerca de las características de las imágenes seleccionadas (pares de imágenes) que se han utilizado para investigar la continuidad y compatibilidad entre los diferentes sensores. La selección de estas imágenes se ha realizado atendiendo al hecho de que son observaciones realizadas por dos sensores en una misma o muy cercana fecha, con el objetivo de minimizar los cambios de la superficie terrestre durante las observaciones y así poder compararlas. Las imágenes utilizadas cubren un amplio rango de valores de NDVI, yendo desde suelo desnudo a vegetación densa, ya en que las áreas que hemos seleccionado para este proceso hay un gran variedad de cultivos. Este aspecto es importante para la aplicación de nuestra metodología en zonas homogéneas que mostraremos en el capítulo III. En las figuras II.2 y II.3 se muestran las fechas disponibles de estos sensores, con las que se han realizado las comparaciones entre ellos.

Tabla II.1. Características de los satélites utilizados en nuestra constelación virtual. PAN: Pancromática; VIS: visible; NIR: infrarrojo cercano; SWIR: infrarrojo medio; TIR: infrarrojo térmico.

	<i>Satélite- sensor</i>	<i>Ciclo</i>	<i>Swath (km)</i>	<i>Número de bandas espectrales</i>	<i>Pixel (m)</i>
 Resolución espacial	QuickBird	3- 7 días	16.5	1 PAN 3 VIS 1NIR	0,61- 2,44
	FORMOSAT- 2	diaria	24	1 PAN 3 VIS 1NIR	2- 8
	Terra- ASTER	16 días	60	2VIS 1NIR 6SWIR 5TIR	15-30- 90
	DEIMOS 1- DMC	2- 3 días	600	2VIS 1NIR	20
	DEIMOS – UKDMC2				
	IRS -1D LISS III	24 días	140	1 PAN 2 VIS 1NIR 1SWIR	5,8- 23,5
	Landsat 7- ETM+	16 días	185	1 PAN 4VNIR 2SWIR 1TIR	15- 30-60
	Landsat 5- TM	16 días	185	4VNIR 2SWIR 1TIR	30-120
	Terra- MODIS	Diaria	2330	10VIS 8NIR 2SWIR 16TIR	250-500- 1000
	NOAA 16- AVHRR	2 por día	3.000	2VNIR 3TIR	1100

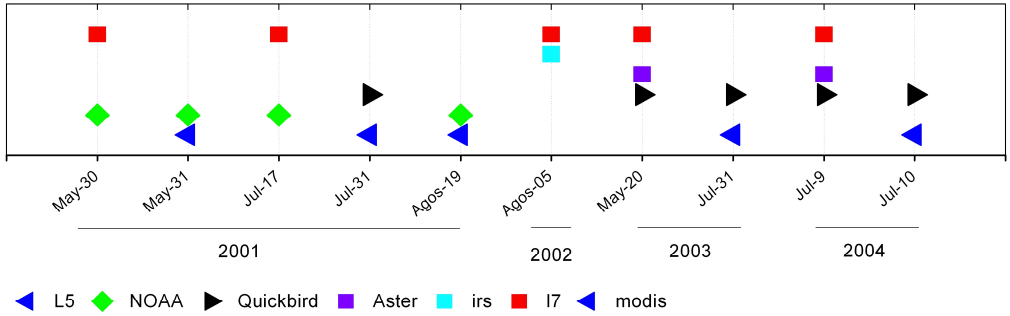


Figura II.2. Fechas de las imágenes disponibles de los sensores indicados, de los años 2001 y 2004.

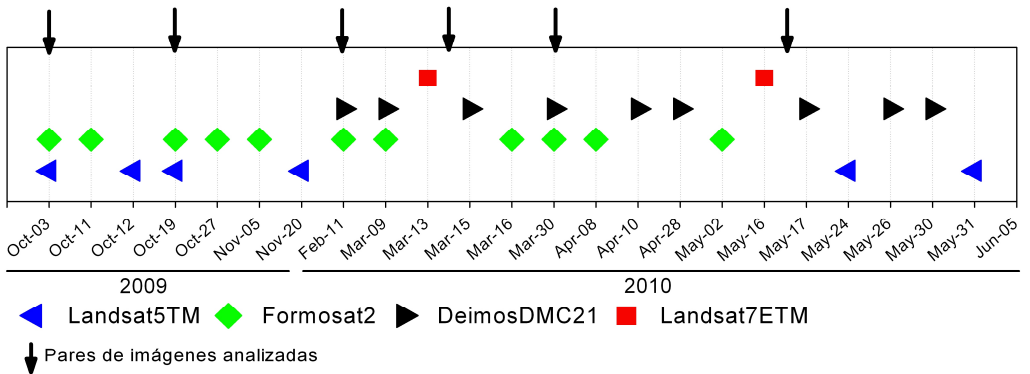


Figura II.3. Fechas de las imágenes disponibles de los sensores indicados, de los años 2009 y 2010.

II.3 Corrección geométrica

Las imágenes captadas por los sensores son proyecciones de una superficie esférica e irregular sobre un plano. El tipo de proyección depende en cada caso de las características ópticas y mecánicas del sensor, de la altura y órbita o trayectoria del satélite y del ángulo con que es observada la superficie terrestre.

El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada píxel su localización en un sistema de coordenadas estandar (UTM, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen con imágenes otros sensores o con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud.

Las correcciones necesarias para transformar de cada punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila-columna) en coordenadas reales (X e Y, UTM por ejemplo) se explicitan, generalmente, con funciones polinómicas de grado variable ajustadas por mínimos cuadrados. Sin embargo en algunos casos pueden utilizarse funciones más complejas que incorporen parámetros de órbita de la plataforma.

Debido al método multitemporal, se van a utilizar imágenes de diferentes fechas y procedentes de diferentes sensores que tienen que ser registrados geoméricamente con la precisión del sub- píxel con el fin de evitar efectos espurios de los productos derivados. Con el fin de poder superponer productos de diferentes fechas y diferentes sensores, va a ser necesaria una corrección geométrica precisa. La corrección geométrica de estas imágenes es realizada en dos pasos. En el primer paso, una serie de puntos tomados con GPS son usados como puntos de control (*Ground Control Points*, GCPs) para rectificar una banda pancromática de mayor resolución espacial, es decir la banda pancromática de ETM+ de 15 m de tamaño de píxel (29 Agosto, 1999). El número de puntos de control necesarios es determinado por el tamaño de la imagen y el número de coeficientes de la función polinómica utilizada. En el segundo paso, esta imagen es usada como maestra para corregir las diferentes bandas, usando el método de convolución cúbica.

Las imágenes de salida son remuestreadas al tamaño de pixel estándar de nuestros productos. En ambos casos, para ajustar las imágenes se aplica un polinomio de segundo orden, ya que permite realizar la corrección de distorsiones no lineales así como de escala, rotación y translación. Como estos

polinomios sólo corrigen en la zona de los GCPs, se requieren un gran número GCPs para corregir las distorsiones en una imagen. Por ello, se usan unos 100 GCPs para codificar tanto la imagen maestra, como para corregir las imágenes llamadas esclavas. Esta georreferenciación es válida si el error medio cuadrático (*Root Mean Square Error*, RMSE) de los residuales del polinomio es menor de 0.5. Después de la corrección geométrica, en el caso del sensor Landsat, las imágenes son remuestreadas a un tamaño estándar de píxel de 25 m por razones prácticas.

II.4 Procedimiento de calibración radiométrica

Asegurar la consistencia entre imágenes multitemporales es objeto de múltiples técnicas. Un paso importante en este proceso es poner los datos de diferentes sensores en una escala radiométrica común (Chander et al, 2010). Las técnicas usuales de corrección radiométrica permiten obtener un producto que corrige los cambios en el calibrado del sensor, así como los cambios en los ángulos de iluminación y observación; las más usuales de entre ellas asumen un comportamiento lambertiano de la superficie terrestre. La aplicación de estas técnicas conduce a productos de reflectividad y NDVI, que se suelen denominar “en el techo de la atmósfera”, TOA.

II.4.1 Conversión a radiancias espectrales.

El cálculo de las radiancias es el paso fundamental para convertir los datos de imagen de múltiples sensores y plataformas a una escala radiométrica común con significado físico. La calibración radiométrica de los sensores de MSS, TM, ETM + implica reescalar los números digitales sin procesar (Q) transmitidos desde el satélite a números digitales calibrados (Q_{cal} , son los valores DNs que los usuarios reciben con los productos de nivel 1 de Landsat), que tienen la misma escala radiométrica para todas las escenas procesadas durante un período determinado.

Durante la calibración radiométrica, los valores de los píxeles (Q) de los datos de imagen sin procesar, del nivel 0, se convierten en unidades de radiancia espectral absoluta mediante cálculos en 32 bits. Los valores de radiancia absoluta, a continuación, son escalados a datos en 7-bit (MSS, $Q_{calmax}=127$), 8-bit (TM and ETM+, $Q_{calmax}=255$), and 16-bit (ALI, $Q_{calmax}=32767$). Estos son los datos Q_{cal} antes de la salida a los medios de distribución. La conversión de los números Q_{cal} a radiancia espectral (L_s) requiere conocer el límite inferior y superior de los factores de reescalado originales. Las ecuaciones que se muestran a continuación

son usadas para realizar la conversión de Q_{cal} -a- L_{λ} para los productos de nivel 1 (Chander et al, 2009):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) (Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale} \quad (TM, ETM+) \quad (2)$$

donde:

$$G_{rescale} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \quad (3)$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) Q_{cal\ min} \quad (4)$$

donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor [$W/(m^2\ sr\ \mu m)$]

Q_{cal} = Valor del pixel calibrado [DN]

$Q_{cal\ min}$ = Valor mínimo del pixel calibrado correspondiente a $LMIN_{\lambda}$ [DN]

$Q_{cal\ max}$ = Valor máximo del pixel calibrado correspondiente a $LMAX_{\lambda}$ [DN]

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral que es escalada a $Q_{cal\ min}$ [$W/(m^2\ sr\ \mu m)$]

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral que es escalada a $Q_{cal\ max}$ [$W/(m^2\ sr\ \mu m)$]

$G_{rescale}$ = Factor de ganancia (gain) rescalado, específico de cada banda [$(W/(m^2\ sr\ \mu m))/DN$]

$B_{rescale}$ = Factor de sesgo (bias) rescalado, específico de cada banda [$(W/(m^2\ sr\ \mu m))/DN$]

Históricamente, la información de calibración de MSS y TM se presenta en las unidades de la radiancia espectral de $mW/(cm^2\ sr\ \mu m)$. Para mantener consistencia con la radiancia espectral de ETM+, se usan también las unidades de $W/(m^2\ sr\ \mu m)$ en la información de calibración de TM y MSS. El factor de conversión es de 1: 10 al convertir de unidades $mW/(cm^2\ sr\ \mu m)$ a $W/(m^2\ sr\ \mu m)$. En las tablas II.2 y II.3 se resumen el rango espectral, los rangos de post-

calibración (parámetros de escalado L_{MIN_λ} y L_{MAX_λ} y los correspondientes factores de reescalado, ganancia [$G_{rescale}$] y sesgo [$B_{rescale}$]), así como la irradiancia solar extraterrestre ($ESUN_\lambda$), para los sensores TM y ETM+. Los rangos de post-calibración dinámicos que se resumen en las tablas II.2 y II.3 sólo son aplicables a los datos de Landsat tratados y distribuido por USGS.

En el caso de los sensores LISS-III 1D, ASTER y QuickBird la radiancia TOA recibida por el sensor, como función de los niveles digitales (ND) de la imagen para cada banda, se obtiene mediante una relación lineal entre la respuesta del instrumento y la radiancia registrada por el sensor de la siguiente manera:

$$L_i^c = a_{0,i} + a_{1,i} DN_i \quad (\text{LISS}) \quad (5)$$

donde a_0 y a_1 son los coeficientes de calibrado del sensor (tabla II.4).

$$L_i^c = (DN_i - 1) \cdot UCC_i \quad (\text{ASTER}) \quad (6)$$

$$L_i^c = absCalFact_i \cdot K_i \cdot DN_i \quad (\text{QuickBird}) \quad (7)$$

donde:

UCC (*Unit Conversion Coefficient*), es un factor para convertir DN a radiancias.

$absCalFact$ (*absolute radiometric Calibration Factor*), es el factor para una banda dada i .

K es un factor de conversión de factores de calibración absolutos originales a factores revisados para una determinada banda (tabla II.4).

$K=1$ para imágenes después del 6 de Junio de 2003 y para imágenes anteriores a esta fecha se muestran en la tabla II.4, así como los coeficientes de calibración e irradiancia solar extraterrestre para cada banda espectral i , para LISS-III 1D, QuickBird y ASTER.

Tabla II.2. Rango espectral, rangos de post- calibración (parámetros de escalado $L_{MIN,\lambda}$ y $L_{MAX,\lambda}$ y los correspondientes factores de reescalado, ganancia [$G_{rescale}$] y sesgo [$B_{rescale}$]), así como la irradiancia solar extraterrestre ($ESUN_\lambda$), para Landsat5 TM.

<i>Banda</i>	<i>Rango espectral (μm)</i>	<i>$L_{MIN,\lambda}$</i> W/(m ² sr μm)	<i>$L_{MAX,\lambda}$</i> W/(m ² sr μm)	<i>$G_{rescale}$</i> (W/m ² sr μm)/DN	<i>$B_{rescale}$</i> W/(m ² sr μm)	<i>$ESUN_\lambda$</i> W/(m ² μm)
TM1	0,452- 0,514	-1.52	169	0,671339	-2,19	1983
TM2	0,528- 0,609	-2.84	333	1,322205	-4,16	1796
TM3	0,626- 0,693	-1.17	264	1,043976	-2,21	1536
TM4	0,776- 0,904	-1.51	221	0,876024	-2,39	1031
TM5	1,567- 1,784	-0.37	30,2	0,120354	-0,49	220
TM7	2,097- 2,346	-0.15	16,5	0,065551	-0,22	83,44

Tabla II.3. Rango espectral, rangos de post- calibración (parámetros de escalado L_{MIN_λ} y L_{MAX_λ} y los correspondientes factores de reescalado, ganancia [$G_{rescale}$] y sesgo [$B_{rescale}$]), así como la irradiancia solar extraterrestre ($ESUN_\lambda$), para Landsat7 ETM+.

Banda	Rango espectral (μm)	L_{MIN_λ} W/(m² sr μm)	L_{MAX_λ} W/(m² sr μm)	$G_{rescale}$ (W/m² sr μm)/DN	$B_{rescale}$ W/(m² sr μm)	$ESUN_\lambda$ W/(m² μm)
Ganancia baja						
ETM+1	0,452- 0,514	-6,2	293,7	1,180709	-7,38	1997
ETM+2	0,519- 0,601	-6,4	300,9	1,209843	-7,61	1812
ETM+3	0,631- 0,692	-5,0	234,4	0,942520	-5,94	1533
ETM+4	0,772- 0,898	-5,1	241,1	0,969291	-6,07	1039
ETM+5	1,547- 1,748	-1,0	47,57	0,191220	-1,19	230,80
ETM+7	2,065- 2,346	-0,35	16,54	0,066496	-0,42	84,90
Ganancia alta						
ETM+1	0,452- 0,514	-6,2	191,6	0,778740	-6,98	1997
ETM+2	0,519- 0,601	-6,4	196,5	0,798819	-7,20	1812
ETM+3	0,631- 0,692	-5,0	152,9	0,621654	-5,62	1533
ETM+4	0,772- 0,898	-5,1	157,4	0,639764	-5,74	1039
ETM+5	1,547- 1,748	-1,0	31,06	0,126220	-1,13	230,80
ETM+7	2,065- 2,346	-0,35	10,80	0,043898	-0,39	84,90

Las imágenes de ETM+ se adquieren estado de ganancia alto o bajo. El funcionamiento de los sensores de TM ha conducido a una comprensión detallada de varios artefactos de la imagen debido a las características particulares del sensor. Estas correcciones son necesarias para mantener la consistencia interna de la calibración dentro de una imagen. El modo de ganancia baja se utiliza para superficies de la imagen con brillo alto (rango dinámico más alto pero sensibilidad baja), y el modo ganancia alta se utiliza para las superficies de la imagen con brillo bajo (rango dinámico pero alta sensibilidad).

Tabla II.4. Coeficientes de calibración e irradiancia solar extraterrestre para cada banda espectral i , para LISS-III 1D, QuickBird y ASTER.

Banda espectral IRS LISS-III 1D	$E_{e,i} (Wm^{-2}\mu m^{-1})$	$a_0 (Wm^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1})$	$a_1 (Wm^{-2}\mu m^{-1} sr^{-1}DN^{-1})$	
LISS-III 2	1933.25	0	0.580392157	
LISS-III 3	1641.33	0	0.614117647	
LISS-III 4	1117.0	0	0.645098039	
LISS-III 5	250.6	0	0.095686275	
Banda espectral QuickBird	$E_{e,i} (Wm^{-2}\mu m^{-1})$	absCalFact ($Wm^{-2}sr^{-1}DN^{-1}$)	K	$\Delta\lambda_{band}^* (\mu m)$
Qb1	1932.014	1.00E-01	1.12097834	0.068
Qb2	1853.567	7.28E-02	1.37652632	0.099
Qb3	1580.931	7.03E-02	1.30924587	0.071
Qb4	1120.708	1.16E-01	0.98368622	0.114
Banda espectral ASTER	$E_{e,i} (Wm^{-2}\mu m^{-1})$	UCC ($Wm^{-2}\mu m^{-1} sr^{-1} DN^{-1}$)		
Ast1	1851.85	0.676		
Ast2	1559.02	0.708		
Ast3	1118.81	0.862		

* $\Delta\lambda_{band}$ es el ancho de banda efectivo para una banda dada.

Los rangos de post- calibración son factores de reescalado específicos para cada banda, que se proporcionan en el fichero de cabecera de los productos de nivel 1. Durante la vida de los sensores de Landsat, se han producido cambios ocasionales en estos factores de reescalado. En el futuro, se prevén cambios, especialmente en los datos de MSS y TM, debido al posible ajuste de las constantes de calibración basado en las comparaciones con mediciones radiométricas absolutas efectuadas sobre el terreno (Chander et al, 2009).

La sensibilidad del detector cambia con el tiempo, provocando un cambio en la ganancia del detector aplicada durante la calibración radiométrica. Sin embargo, los números que se presentan en las tablas II.2 y II.3 son los factores de escalado, que son los rangos dinámicos de post-calibración. Los valores de $LMIN_{\lambda}$ y $LMAX_{\lambda}$ son una representación de cómo los productos de nivel 1 de Landsat se reescalán a unidades de radiancia. Por lo general, no hay necesidad para cambiar el $LMIN_{\lambda}$ o el $LMAX_{\lambda}$, a menos de que algo cambie drásticamente en el sensor. Por tanto ningún factor de reescalado es dependiente del tiempo.

II.4.1.1 Conversión a radiancias espectrales para las imágenes DEIMOS.

Es necesario prestar especial atención a los datos suministrados por el proveedor en el caso del sensor DEIMOS. La ecuación utilizada para obtener L_λ se muestra en la ecuación (5) y en la tabla II.5 se resume las fechas, los correspondientes factores de reescalado, ganancia [$G_{rescale}$] y sesgo [$B_{rescale}$], para los sensores DEIMOS 1- DMC y DEIMOS-UKDMC2. En este caso, se tiene distintos valores de coeficientes de calibrado para cada una de las fechas de adquisición de las imágenes.

$$L_\lambda = Q_{cal} \times \frac{1}{G_{rescale}} + B_{rescale} \quad (5)$$

Tabla II.5. Rango espectral y los correspondientes factores de reescalado, ganancia [$G_{rescale}$] y sesgo [$B_{rescale}$], para DEIMOS.

<i>Fechas</i>	<i>Bandas</i>	<i>Rango espectral (μm)</i>	<i>$G_{rescale}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})/\text{DN}$</i>	<i>$B_{rescale}$ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$</i>
11-02-2010	NIR	0,755-0,906	1.5450578123409882	0.5092459786571079
	R	0,614-0,698	2.4575819332100552	0.34646785118848084
09-03-2010	NIR	0,755-0,906	1.678288069707157	9.073251495285298
	R	0,614-0,698	2.589473796992099	11.120679351502293
15-03-2010	NIR	0,755-0,906	1.8877048369048322	5.4804866716794125
	R	0,614-0,698	2.4332826574940114	9.794000709419501
30-03-2010	NIR	0,755-0,906	1.2646126043850596	9.238159199401883
	R	0,614-0,698	2.0223270337154067	9.238159199401883
16-05-2010	NIR	0,755-0,906	1.0080322744467025	5.691394249393326
	R	0,614-0,698	1.6300801597898202	10.911577918660367

II.4.2 Conversión a reflectividades TOA

La reducción de la variabilidad entre diferentes imágenes puede lograrse mediante la conversión de radiancias espectrales a reflectividades TOA. Algunas de las ventajas que vamos a obtener al utilizar las reflectividades TOA cuando comparamos imágenes procedentes de diferentes sensores son:

En primer lugar, elimina el efecto de coseno de diferentes ángulos cenitales solares debido a la diferencia horaria entre las adquisiciones de las imágenes. En segundo lugar, la reflectividad TOA corrige los diferentes valores de la irradiancia solar extraterrestre surgidos de las diferencias entre bandas espectrales. En tercer lugar, la reflectividad TOA corrige la diferencia de la diferente distancia Sol- Tierra según las fechas de adquisición de las imágenes. Estas variaciones pueden ser significativas geográficamente y temporalmente (Chander et al, 2009).

La reflectividad TOA se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (8)$$

donde:

π es la constante matemática igual a ~ 3.14159 [sin unidades]
 L_{λ} es la radiancia espectral que llega al sensor [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]
 d es la distancia Sol- Tierra [unidades astronómicas]
 $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia solar extraterrestre [$W/(m^2 \mu m)$]
 θ_s es el ángulo cenital solar [grados]

El ángulo cenital solar, θ , representa la posición del sol con respecto a la normal local. Toma valores de 0° a 90° y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (9)$$

donde:

ϕ , es la latitud geográfica
 ω es el ángulo horario
 δ es la declinación solar

La última columna de las tablas II.2 y II.3 resume los valores de la irradiancia solar extraterrestre ($ESUN_{\lambda}$) para TM y ETM + usando el espectro solar de Thuillier (Thuillier et al., 2003). En el caso de los sensores LISS- III 1 D, QuickBird y ASTER, se muestran en la tabla II.4. Para el sensor DEIMOS, los valores de irradiancia solar extraterrestre son los de las bandas de Landsat5-TM.

Los valores de la latitud geográfica (ϕ), declinación (δ), ángulo solar cenital solar (θ) y k (factor de corrección debido a la excentricidad de la órbita terrestre, en función del día del año) para las imágenes de los sensores que han sido procesadas en la Sección de Teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional, se muestran en la tabla II.6.

Tabla II.6. Latitud geográfica (ϕ), declinación (δ), ángulo solar cenital solar (θ) y k (factor de corrección debido a la excentricidad de la órbita terrestre, en función del día del año) para las imágenes de la tabla III.1.

<i>Fecha (Satélite)</i>	ϕ (°)	δ (°)	$\cos \theta$	k
30 Mayo 2001 (Landsat7)	38.9°	21.73°	0.9113	0.9724
31 Mayo 2001 (Landsat5)	38.9°	21.87°	0.8937	0.9720
17 Julio 2001 (Landsat7)	38.53°	21.34°	0.9109	0.9673
05 Agosto 2002 (Landsat7)	38.53°	17.16°	0.8780	0.9711
05 Agosto 2002 (IRS)	38.9°	17.16°	0.9265	0.9711
19 Agosto 2001 (Landsat 5)	38.9°	12.98°	0.8446	0.9758
20 Mayo 2003 (QuickBird)	39.1°	19.90°	0.9117	0.9759
20 Mayo 2003 (Landsat7)	38.53°	19.90°	0.8999	0.9759
20 Mayo 2003 (ASTER)	39.27°	19.90°	0.9199	0.9759
31 Julio 2003 (QuickBird)	39.2°	18.44°	0.9008	0.9698
31 Julio 2003 (Landsat5)	38.9°	18.44°	0.8766	0.9698
09 Julio 2004 (ASTER)	39.27°	22.48°	0.9373	0.9667
10 Julio 2004 (Landsat5)	38.53°	22.36°	0.8987	0.9667

II.5 Corrección atmosférica

En el caso de que no existiera atmósfera, la radiación electromagnética procedente del sol sólo cambiaría cuando es reflejada por la superficie. Sin embargo, la atmósfera terrestre actúa como una distorsión de las medidas realizadas desde el espacio. La interacción entre la radiación electromagnética y los componentes atmosféricos como son los gases y aerosoles se produce mediante procesos de dispersión y absorción (Liou, K.N., 2002). La absorción hace decrecer la intensidad de la luz a través de la atmósfera, con una fuerte dependencia de la longitud de observación. Esto es causado principalmente por los gases. Por otro lado, la dispersión actúa modificando la dirección de propagación, lo que hace que se produzca un aspecto borroso y una pérdida de brillo en la imagen, debido a que parte de los fotones que llegan al sensor no son reflejados por el foco de observación, sino que provienen de sus alrededores. En este caso, tanto gases como aerosoles producen la dispersión de la radiación.

Como consecuencia de todo esto, la información transmitida desde la superficie al sensor es atenuada y distorsionada por la atmósfera. La reparación de estos efectos, conocida como corrección atmosférica, es muy importante para una posterior aplicación de los datos medidos por el sensor. Un código de transferencia radiativa es necesario para simular la interacción de la radiación con la atmósfera y la superficie. El ya conocido código 6S y MODTRAN es el que normalmente se usa para este propósito (Vermote et al., 1997).

Dependiendo del nivel de heterogeneidad de la superficie, la superficie natural se clasifica en homogénea (la reflectividad de la superficie es espacialmente invariante) y heterogénea (la reflectividad de la superficie varía punto a punto dentro de la superficie). Además, dependiendo de las propiedades direccionales de la reflectividad para una determinada superficie, esta puede ser Lambertiana (la radiación reflejada es la misma en cualquier dirección de observación) y no-Lambertiana (la radiación reflejada cambia con la dirección de observación). La técnica más común y simple para la corrección atmosférica es considerar una superficie homogénea y Lambertiana, la cual puede ser suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

Los efectos de la atmósfera contribuyen significativamente en la señal recibida por el satélite. El quitar estos efectos o al menos normalizarlos, es muy importante sobre todo en zonas con baja reflectividad como son áreas de agua, de donde se cuenta con la mayor proporción de la señal recibida por el satélite en

las bandas del visible y por tanto en este tipo de superficies se puede evaluar la eficacia de los diferentes métodos disponibles (Hadjimitsis et al, 2004). El impacto de la atmósfera se minimiza aplicando las denominadas correcciones atmosféricas, y es un campo todavía en evolución en teledetección. Aplicando la corrección radiométrica y la corrección atmosférica se obtendría el producto final, esto es la reflectividad y el NDVI de la superficie, en el que se han eliminado o reducido los efectos anteriormente descritos.

Hadjimitsis et al. (2004) divide los métodos de corrección atmosférica en 2 categorías:

- Correcciones absolutas: En esta categoría se incluyen aquellas correcciones que requieren de las condiciones ópticas atmosféricas como parámetros de entrada para estimar la reflectividad de superficie. A la vez, puede dividirse en 2 sub-categorías:
 - Las correcciones atmosféricas basadas en la imagen, Sustracción de objetos oscuros (*Dark object subtraction*, DOS) (Chavez, 1988) y Método de matriz de covarianza (Covariance matrix method, CMM).
 - Las que utilizan datos independientes como condiciones ópticas atmosféricas (Algoritmos de transferencia radiativa como el código 6S y Lowtran).
- Correcciones relativas: El objetivo en este tipo de correcciones es normalizar una serie de imágenes multitemporal, de manera que, las imágenes corregidas aparezcan como si hubieran sido obtenidas bajo las mismas condiciones atmosféricas y con el mismo sensor que la imagen tomada como referencia.

La necesidad de desarrollar métodos de procesamiento operacionalmente simples, ha conducido a un gran número de autores a hacer uso de zonas cuyas reflectividades de suelo no cambien significativamente con el tiempo, es decir las zonas llamadas pseudo- invariantes (PIT), para poder normalizar los datos de la imagen. Uno de los métodos ampliamente utilizados y que utiliza este tipo de zonas en una serie de imágenes de satélite es el Método de normalización multitemporal (*Multi-temporal Normalization*, MTN) (Caselles and García, 1989; Schroeder et al, 2006). Este método se basa en la normalización de los datos espectrales de todas las imágenes con respecto a una imagen estándar, la cual es elegida como la imagen de referencia, preferiblemente aquella libre de nubes y con alto contraste. La normalización es aplicada buscando zonas PIT conocidas en la escena. Estas zonas se buscan a mano, y son aquellas con características

como el asfalto, carreteras, edificios que no cambian espectralmente de una imagen a otra (Caselles and García, 1989). La implementación de este método es usando el método de regresión lineal, relacionando la imagen de referencia con las otras imágenes de la serie temporal. Sin embargo, hay una cierta incertidumbre en como de "clara" y libre de efecto atmosféricos es la imagen de referencia, por lo que se habla de una "corrección relativa".

Hadjimitsis et al., (2009) también presenta una alternativa al método de corrección atmosférica absoluta, que es la corrección simultánea de una serie temporal de imágenes de satélite usando el método de regresión lineal para un rango de zonas pseudo- invariantes. En este caso se tiene que aplicar una serie de simplificaciones significantes que son: Considerar la superficie de la Tierra Lambertiana, considerar que los efectos de la atmósfera son uniformes a lo largo de la imagen y que no hay diferencias de iluminación. Las zonas pseudo-invariantes seleccionadas en la imagen que se van a corregir deben tener un amplio rango de reflectividades y un tamaño adecuado con respecto al tamaño de pixel de la imagen. Las diferencias más significativas con respecto a otros métodos de normalización son los siguientes:

- No se selecciona ninguna imagen de referencia.
- No se utilizan sólo imágenes de una misma temporada.
- La media de las reflectividades de suelo medidas en la selección de zonas invariantes, se consideran valores reales para todas las imágenes en la serie temporal.
- Los valores de reflectividad del suelo se representan frente a las reflectividades medidas por el satélite para cada imagen.

En la bibliografía se describen múltiples procedimientos de correcciones tanto absolutas como relativas; En algunos casos, como es el caso de Schroeder et al. (2006), se aplican a las bandas espectrales del sensor analizado. Este presenta una comparación de 5 métodos de corrección atmosférica (2 de corrección relativa y 3 de corrección absoluta) usando 19 imágenes de Landsat TM/ETM+. En teoría, la corrección absoluta de imágenes individuales debería minimizar los efectos atmosféricos en una serie de imágenes cuya respuesta espectral es más similar que la misma serie de imágenes sin corregir. Pero contradiciendo a esta teoría, se demuestra como los métodos de corrección absoluta como 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), MDDV (*Modified Dense Dark Vegetation*), y DOS (*Dark Object Subtraction*),

obtienen imágenes de una serie temporal cuya respuesta espectral es algo menos similar a las otras imágenes.

Los métodos relativos son variantes del método que se conoce como "normalización- absoluta", que corrige una serie temporal de imágenes con respecto a una imagen de referencia utilizando las zonas pseudo-invariantes y la regresión por reducción de eje mayor (*Reduced Major Axis*, RMA). Una ventaja de la "normalización- absoluta" es que toda la serie temporal de imágenes son corregidas a reflectividades de superficie y simultáneamente son corregidas de los efectos atmosféricos. En este artículo (Schroeder et al, 2006) concluyen demostrando como la citada "normalización- absoluta" mejora (es decir, reduce la dispersión) los modelos de reflectividad espectral utilizados para caracterizar los patrones de superficie forestal temprana.

En otros casos, los métodos de corrección atmosférica se aplican a los índices de vegetación. Uno de ellos es Chen et al. (2005), el cual desarrolla un método de normalización de superficies invariantes en imágenes multitemporales para la detección de cambios, mediante la normalización de los índices de vegetación a través del método de grupos temporalmente invariantes (*Temporally Invariant Cluster*, TIC).

II.5.1 Procedimiento aplicado para la corrección atmosférica de las imágenes Landsat 5- TM y Landsat 7- ETM+.

Las imágenes Landsat 5- TM y Landsat 7- ETM+ utilizadas en este trabajo, ver Figuras II.2 y II.3 y tabla III.1, han sido corregidas atmosféricamente mediante el procedimiento diseñado por Luis Guanter específicamente para estas imágenes en el marco de las actividades del proyecto DEMETER. Este también ha sido aplicado exitosamente sobre otros sensores como ENVISAT/MERIS (Guanter et al., 2004) o PROBA/CHRIS (Guanter et al., 2005). Una breve descripción tanto de los antecedentes del método como de las características técnicas se da a continuación.

Para obtener un producto elaborado como la reflectividad de la superficie hay que eliminar la contribución de la atmósfera a la radiancia que recibe el sensor. En una segunda fase, se desacoplan los efectos de superficie y atmósfera, para después derivar la reflectividad de la superficie teniendo en cuenta la influencia de la iluminación y la topografía del terreno, así como el efecto de

adyacencia. La metodología empleada en nuestras imágenes de Landsat es similar a la corrección atmosférica usada en imágenes MERIS (Guanter et al. 2008).

Un enfoque general, el cual es también usado en el código 6S, es desacoplar la absorción y la dispersión como si la parte absorbida fuera en una capa por encima de otra que contiene la dispersada. Esto puede considerarse en aquellas longitudes de onda donde la absorción no es demasiado fuerte.

La ecuación de transferencia radiativa para una superficie homogénea y Lambertiana con reflectividad ρ_s , observada por un sensor a bordo de un satélite (desde un ángulo zenital θ_v y un ángulo acimutal ϕ_v) e iluminada por el sol (θ_s, ϕ_s) es:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = t_g \left[\rho_0 + \frac{T^\downarrow(\mu_s)T^\uparrow(\mu_v)\rho_s}{1 - S\rho_s} \right] \quad (10)$$

donde:

$\mu = \cos(\theta)$, $\phi = \text{abs}(\phi_s - \phi_v)$, ρ_0 corresponden a la reflectancia intrínseca de la atmósfera.

$T^\downarrow(\mu_s)$ y $T^\uparrow(\mu_v)$ es la transmitancia por dispersión en el trayecto entre el Sol y la superficie y entre la superficie y el sensor.

S es el albedo esférico de la atmósfera, es decir la reflectividad de la radiación difusa que llega del suelo.

t_g es la transmitancia debida a gases atmosféricos, siendo los principales H_2O , CO_2 , O_2 y O_3 .

La reflectividad en el techo de la atmósfera (TOA) está relacionada con la radiancia medida por el satélite como:

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L_{TOA}}{\mu_s I_{SC}} \quad (11)$$

donde I_{sc} es la constante solar espectral (spectral solar constant) proporcionada por el código de transferencia radiativa 6S

II.5.1.1 Descripción y características técnicas del método

El módulo ha sido diseñado para la corrección atmosférica de las imágenes de Landsat en las 6 bandas que cubren el espectro solar. El algoritmo trabaja recuperando los parámetros atmosféricos necesarios para la cuantificación del efecto atmosférico sobre la radiación mediante un proceso de inversión en 5 píxeles de referencia.

En este procedimiento se obtiene una estimación de los contenidos de aerosoles y de vapor de agua en el momento de adquisición de la propia imagen. El sistema de recuperación se basa en asumir que el estado de la atmósfera es invariante en una ventana espacial dentro de la imagen de Landsat, mientras que la reflectividad de la superficie varía de píxel a píxel. Para la construcción de radiancias TOA sintéticas en este proceso de inversión, se hace un modelo de la reflectividad de la superficie mediante la combinación lineal de espectros de suelo y de vegetación, con 2 coeficientes que pesan las proporciones del suelo y la vegetación. Por tanto, los aerosoles y el contenido en vapor de agua son obtenidos simultáneamente de 5 píxeles, siendo parámetros libres en la minimización de una Función Merit dada, comparando radiancias espectrales TOA de Landsat actuales y simuladas. El algoritmo de Minimización de Powell (Press et al., 1986) ha sido seleccionado para realizar la inversión por su velocidad de convergencia. Estos 5 píxeles son extraídos de la imagen, con el criterio de tener el máximo contraste espectral posible, con el fin de garantizar la discriminación de la contribución de la superficie y la atmósfera a la señal TOA. La estrategia más frecuente de usar targets oscuros en la recuperación de aerosoles se evita con este objetivo, el cual hace que el algoritmo sea aplicable a cualquier target de superficie, de tal manera que áreas con vegetación y suelo desnudo están presentes en la ventana dentro de la imagen.

Una vez se han calculado las funciones de transmisión y reflectividad de la atmósfera, el algoritmo desacopla los efectos radiativos de la superficie y de la atmósfera, asumiendo un comportamiento Lambertiano en la reflectividad del target, el cual es justificado por la visión de Landsat en el nadir. Después de esto, se lleva a cabo un tratamiento para extraer la borrosidad debido a la dispersión múltiple. Se recomienda aplicarlo solamente en la ventana dentro de la imagen que contiene la zona de estudio.

Este algoritmo fue diseñado con el objetivo de ser aplicado en el pre-proceso de imágenes para la construcción de un archivo de imágenes multitemporal de

las zonas de estudio de DEMETER. Por lo que, variaciones laterales en el ángulo de iluminación y en el estado atmosférico no son tenidos en cuenta, sino que son referidos a un punto de referencia establecido por el usuario, normalmente en el centro de la zona de estudio. Esto significa que la fiabilidad del proceso de corrección atmosférica, puede garantizarse solamente en un área cercana a ese punto, y no en la imagen.

En un proceso en cadena, debe tomarse en cuenta que puede aparecer alguna susceptibilidad en las correcciones atmosféricas y geométricas: Si la corrección geométrica basada en la interpolación con los píxeles vecinos, se aplica antes o después de la corrección atmosférica, pueden obtenerse resultados ligeramente diferentes. Esto es debido al hecho de que la extracción de efectos adyacentes se trata de la disociación de la señal ToA de los fotones que provienen de los alrededores de un píxel dado. Por ello, la corrección de los efectos adyacentes implica la evaluación del entorno del target, el cual podría haber cambiado si a priori se realiza una corrección geométrica basada en la interpolación con los píxeles vecinos.

En términos generales, se puede notar como la reflectividad en el visible, decrece después de eliminarse la contribución de la dispersión, mientras que en las regiones del infrarrojo cercano aumenta, principalmente por la corrección de la atenuación por absorción. Estos hechos son especialmente relevantes cuando el uso final de los datos es la derivación de los índices de vegetación que se utiliza en la evaluación de la evolución de cultivos.

Las correcciones en el espectro visible y en el infrarrojo cercano afectan al NDVI. La corrección atmosférica conduce a un aumento general de su valor absoluto, principalmente en los píxeles de vegetación debido a que estos son más sensibles a los cambios en esas regiones espectrales. El NDVI generalmente aumenta después de la corrección de la atmósfera, lo que confirma las predicciones teóricas.

Este procesador proporciona reflectividades de superficie de las bandas 1-5 y la 7 de Landsat TM y ETM+ a partir de los correspondientes niveles digitales (DN). Con el fin de ahorrar espacio en disco, las imágenes de salida se formatean como enteros sin signo de 2 bytes, con la reflectividad superficial que va desde 0 hasta 10000 (10000 correspondería a un 100% de reflectividad).

Las entradas obligatorias que han de ser proporcionadas por el usuario son:

- Parámetros de calibración con factores de ganancia de TM e irradiancia solar extraterrestre.
- Coordenadas de 5 píxeles de referencia.
- Posición y tamaño de una ventana que contiene la zona de estudio. Información de adquisición (altura de tiempo, latitud, longitud y superficie).

II.5.2 Procedimiento aplicado para la corrección atmosférica de las imágenes MODIS

Aunque los productos MODIS han sido descargados de la página web (<http://modis.gsfc.nasa.gov>), se procede a una descripción del algoritmo utilizado para su corrección atmosférica, (Vermote and Vermeulen, 1999).

El propósito de este algoritmo es proporcionar la reflectividad en la superficie de la tierra corregida atmosféricamente para la evaluación de cambios globales. Dicha reflectividad, que es el producto de la aplicación de algoritmos de corrección atmosférica a la radiancia medida por MODIS, es el parámetro de entrada para otros productos. Estos productos incluyen el albedo de la superficie, cubierta de nieve, cubierta de la tierra, cambio de cobertura terrestre, índices de vegetación y variables biofísicas. La calidad de estos productos depende directamente de la calidad del algoritmo de corrección atmosférica y de la precisión de la reflectividad superficial (Running et al., 1994).

La figura II.4 proporciona una visión general de la cadena de transformación, que incluye la corrección de la dispersión y absorción de gases, dispersión y absorción de los aerosoles, contaminación de cirrus, acoplamiento de BRDF y el efecto de adyacencia.

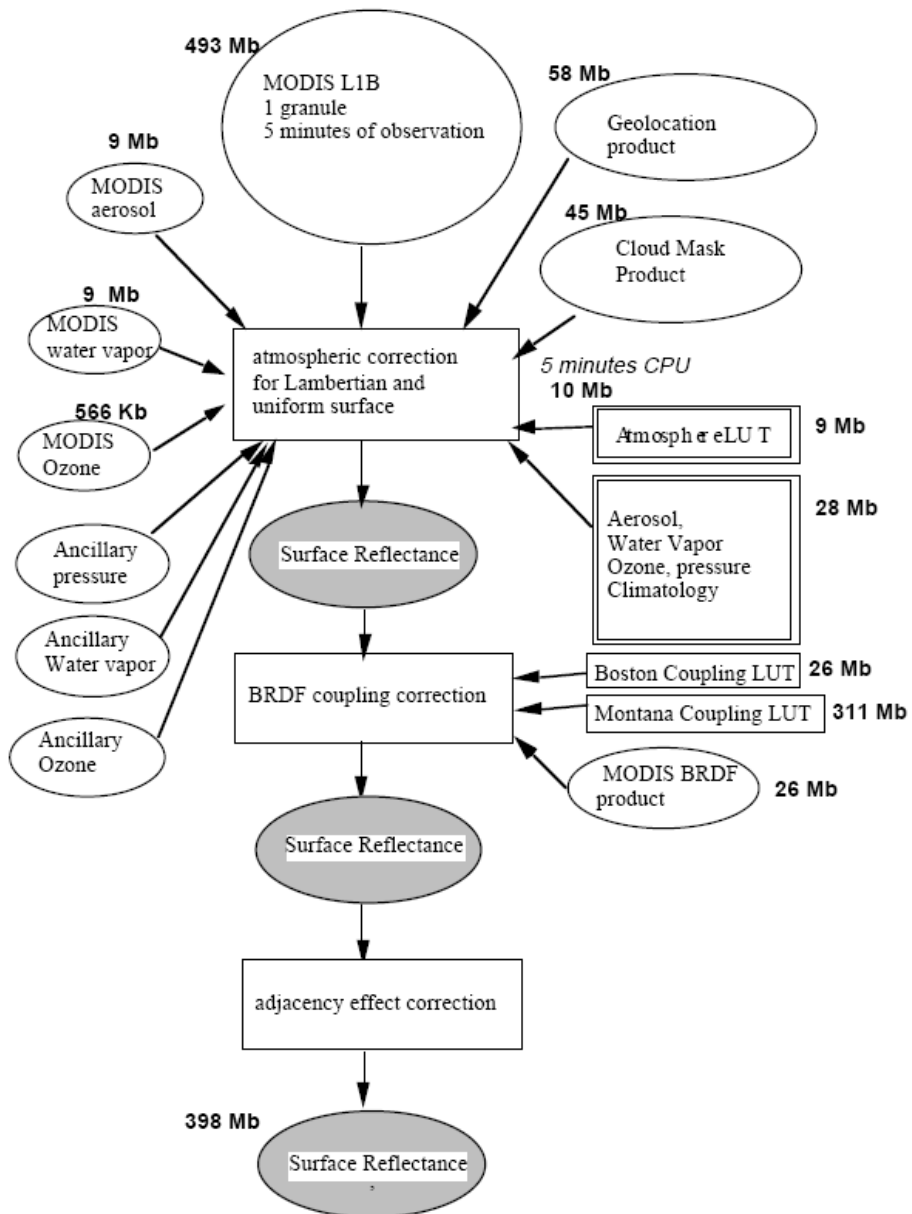


Figura II.4. Diagrama de flujo de la corrección atmosférica (versión 1) de las imágenes de MODIS (Vermote and Vermeulen, 1999).

Debido a que la composición de gases de la atmósfera será relativamente conocida, la corrección por la dispersión y absorción de gases será implementada en el inicio del algoritmo, sin embargo la corrección de los efectos de los aerosoles depende de otros productos MODIS utilizados como entrada que deben evaluarse antes de emplearse en el esquema de corrección atmosférica. Por ello debe implementarse una corrección debida a aerosoles dependiente de la climatología alcanzada en días claros.

Al inicio del algoritmo se implementa un plan de corrección de nubes de primer orden, que se sustituye después por técnicas más sofisticadas. Las correcciones del acoplamiento de BRDF y de los efectos de adyacencia de superficie, las cuales forman parte del algoritmo, solo se activarán cuando la otra parte del algoritmo y la interfaz con el producto de aerosoles son completamente probadas y realizado el control de calidad.

II.5.2.1 Implementación del algoritmo

La radiancia recibida por MODIS en el techo de la atmósfera válido para una superficie lambertiana es:

$$L_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = L_0 + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)F_0\mu_0\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{\pi[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)S]} \quad (12)$$

donde:

L_{TOA} es la radiancia recibida por el satélite en el techo de la atmósfera.

L_0 es la radiancia intrínseca de la atmósfera.

$T(\mu_s)$ y $T(\mu_v)$ son la transmitancia por dispersión en el trayecto entre el Sol y la superficie (y entre la superficie y el sensor).

F_0 es la radiación solar en la parte superior de la atmósfera.

$\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)$ corresponde a la reflectividad superficial con ninguna atmósfera por encima.

S es el albedo esférico de la atmósfera, es decir la reflectividad de la radiación difusa que llega del suelo.

μ_s es el coseno del ángulo solar cenital, μ_v es el coseno del ángulo de visión.

$\phi = abs(\phi_s - \phi_v)$, es la diferencia acimutal entre los ángulos cenitales.

La radiancia de la ecuación (8) puede normalizarse por la radiación solar $F_0\mu_s/\pi$, resultando la siguiente ecuación:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s)T(\mu_v)\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)S]} \quad (13)$$

donde:

ρ_{TOA} es la reflectividad en el techo de la atmósfera.

ρ_0 corresponde a la reflectancia intrínseca de la atmósfera.

T se divide en la parte difusa y la parte directa de la siguiente manera:

$$T(\mu) = e^{-\tau/\mu} + t_d(\mu) \quad (14)$$

y del mismo modo para $T(\mu_s)$, donde τ es el espesor total óptico y t_d la transmitancia difusa.

Las cantidades $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)$, $t_d(\mu)$ y S son funciones del espesor óptico (t), del albedo (w), y de la función $(P(\theta))$ de la parte dispersada y absorbida en la atmósfera.

El cálculo de las cantidades $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)$, $t_d(\mu)$ y S se consigue con la ayuda de un programa de transferencia radiativo como el modelo de Dave and Gazdag (1970). Sin embargo, resulta computacionalmente imposible ejecutar un modelo de transferencia radiativo para cada píxel en un conjunto de datos global diario. Por lo tanto, se crea una tabla de búsqueda con el código de 6S (Vermote et al., 1997). Esta tabla suministrará las cantidades $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)$, $t_d(\mu)$ y S para una variedad de diferentes geometrías de posiciones del sol:

- $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)$ es precalculado con 73 ángulos acimutal, 22 ángulos cenital solar, 22 ángulos de visión cenital y 10 espesores ópticos de aerosoles.

- $t_d(\mu)$ es precalculada con 16 ángulos cenital solar y 10 espesores ópticos de aerosoles.

- S es precalculada con 10 espesores ópticos de aerosoles.

Los cálculos de la transferencia radiativa son dependientes de los datos de entrada en el modelo.

II.5.2.2 Resumen del algoritmo

1) En una escala de 5 km x 5 km, se utilizan $\mu_s, \mu_v, \phi, \tau_a$ (espesor óptico de aerosoles), τ_s (espesor óptico de la estratosfera), τ_r (espesor óptico de Rayleigh), un modelo de aerosoles y *look-up tables* para generar $\rho_R(\mu_s, \mu_v, \phi), \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi), t_d(\mu)$ y S .

-En el lanzamiento del algoritmo: τ_a se obtiene climatológicamente. τ_s se obtiene de datos *SAGE (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment)*.

-Después del lanzamiento: τ_a se obtiene del algoritmo de MODIS, allí donde no hay climatología disponible; τ_s se obtiene del algoritmo de MODIS.

2) En cada malla de 5 km x 5 km, se realiza la corrección debida a la absorción de los gases mediante el vapor de agua precipitable calculado con algoritmos de MODIS

3) Para cada píxel, se corrige el efecto de cirros, utilizando valores en 1,38 μm .

-En el lanzamiento: Se usa una máscara en la cual todos los píxeles contaminados por cirros usando el canal de 1,38 μm se marcarán como tal. La corrección más simple sería suponer que la reflectividad de cirros no tiene ninguna dependencia espectral y es espacialmente homogénea en un radio de 20 km.

-Después del lanzamiento: Se utilizan técnicas más sofisticadas.

4) Para cada píxel, se corrigen efectos de adyacencia.

- En el lanzamiento: no hay corrección.

- Después del lanzamiento: se implementa cuando se prueban otras correcciones.

5) Los resultados son reflectividades de superficie para 7 longitudes de onda en cada píxel.

Datos de entrada

Este algoritmo de corrección atmosférica utiliza productos MODIS como datos de entrada y produce nuevos productos que sirven a su vez para otros algoritmos MODIS.

Los productos derivados de MODIS utilizados como entradas incluyen: radiancia geográficamente registradas y calibradas (MOD02, MOD03) máscaras de nubes (MOD35), espesor óptico de aerosol espectral (MOD04), agua precipitable (MOD05), ozono (MOD07) y producto BRDF del periodo de 16 días anteriores (MOD43). Otros datos auxiliares incluyen un Modelo Digital de Elevación, datos de vapor de agua, ozono y presión en superficie (*Data Assimilation Office, DAO*), datos climatológicos de vapor de agua, ozono y espesor óptico de aerosoles. El algoritmo hace uso de una *look-up table* la cual proporciona los valores necesarios de $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)$, $t_d(\mu)$, términos del acoplamiento BRDF y S para una variedad de geometrías y propiedades de aerosoles. De este modo se evita la necesidad de aplicar el código de transferencia radiativa a cada pixel, de tal manera que se calcula $\rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi)$, $t_d(\mu)$ y S en una malla de 5 km x 5 km, aunque se obtendrá la reflectividad corregida en cada píxel. Esto reduce el tiempo de cálculo.

Datos de salida

Producto L2:

El algoritmo implementado MOD09 procesará diariamente las 7 bandas, con 250 m de resolución espacial (bandas 1 y 2) y con 500 m (bandas 3-7). Los productos de salida contiene las estimaciones de la reflectividad de superficie para cada banda, como si se midiera a nivel del suelo en ausencia de dispersión atmosférica o absorción.

Producto L2G y L3:

El product L2G, son reflectividades de superficie basadas en las reflectividades del producto L2, pero corregido el efecto de aerosoles y gases atmosféricos y se obtiene diariamente. El producto L3 es un compuesto de 8 días, en el cual se seleccionen las mejores condiciones, libres de nubes, durante dicho periodo.

La reflectividad de superficie es el dato de entrada posterior para otros productos de superficie como: Índices de vegetación, BRDF/albedo de superficie, cambios en la cubierta vegetal y LAI/FPAR.

En este trabajo, las imágenes utilizadas de MODIS son MOD09GQ (Version-5 de Terra- MODIS), que proporcionan las bandas 1 y 2 en una resolución de 250 m del producto diario L2G, en la proyección sinusoidal. Este proyecto incluye, además de las reflectividades de las bandas 1 y 2, una valoración de la calidad, la cobertura de observación, y el número de observación.

II.5.3 Procedimiento aplicado para la corrección atmosférica de las imágenes FORMOSAT.

Las imágenes FORMOSAT utilizadas en este trabajo han sido corregidas atmosféricamente por CESBIO de Toulouse, en el marco del proyecto VEN μ S. (Hagolle et al, 2008).

Se dispone de imágenes FORMOSAT síncronas con las imágenes de DEIMOS, es decir, que han sido capturadas en las mismas fechas y aproximadamente a la misma hora.

La misión de VEN μ S proporciona imágenes de alta resolución adquiridas cada día con un ángulo de observación constante, en 12 bandas espectrales desde 415 nm a 910 nm. Con estas características, los efectos direccionales serán reducidos considerablemente ya que solamente los ángulos solares varían lentamente con el tiempo. Para llevar a cabo la corrección atmosférica, se aplican diferentes características:

- Las características ópticas de los aerosoles varían rápidamente con el tiempo pero lentamente con la localización.
- Las reflectividades varían rápidamente con la localización pero lentamente en el tiempo cuando se observan con un ángulo de visión constante.

Durante un periodo de unos cuantos días, las variaciones de la reflectividad en el techo de la atmósfera son debido principalmente a las variaciones de las propiedades ópticas de los aerosoles, lo que indica el modo de cómo estimar estas propiedades. Dichas propiedades son las que se usan en los algoritmos de la misión VEN μ S (Hagolle et al, 2008).

II.5.3.1 Descripción del método de corrección atmosférica usado en FORMOSAT

El método de inversión aplicado para la corrección de las imágenes de FORMOSAT- 2 utiliza las siguientes propiedades:

- Los efectos direccionales de la serie temporal utilizada en el proyecto VEN μ S son minimizados gracias a los ángulos de observación constantes. Por supuesto que los ángulos solares cambian, pero se consideran constantes durante una o dos semanas.
- Las propiedades ópticas de los aerosoles, AOP (*Aerosol Optical Properties*) varían rápidamente con el tiempo y más lentamente con la localización.
- Las reflectividades varían rápidamente con la localización pero lentamente en el tiempo cuando se observan con un ángulo de visión constante.

Por tanto, cualquier cambio en la reflectividad TOA, debe ser interpretado que es debido a una variación de AOP. Es así posible invertir el AOP con el siguiente esquema:

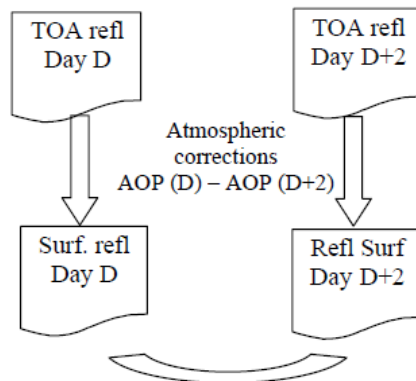


Figura II.5. Esquema de una primera versión de la función de inversión de aerosoles (Hagolle et al, 2008). En esta versión el algoritmo de minimización de Levenberg–Marquardt obtiene las propiedades ópticas de los aerosoles de los días D y D+2 que minimizan las diferencias entre las reflectividades de superficie de los días D y D+2.

Se asume que las imágenes adquiridas en el día D y en el día D+2 son libres de nubes (si no es así, se tomarían imágenes de día D+4 o D+6...). Teniendo en cuenta que la reflectividad de la superficie no cambia en un corto periodo de tiempo, podemos buscar el AOP de los días D y D+2 y minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias de la reflectividad de la superficie para un conjunto de píxeles vecinos (Figura 11.5).

En esta inversión, tenemos dos incógnitas: la AOP del día D y del D + 2 y unas cuantas ecuaciones: una ecuación por pixel y por banda espectral. La corrección atmosférica se realiza utilizando look- up tables construidas con el Código de Dispersión de Órdenes Sucesivas (*Successive Orders of Scattering, SOS*) (Deuze et al., 1989). En esta primera prueba del método, el modelo de aerosol es único y el parámetro a estimar es el espesor óptico del aerosol (*Aerosol Optical Thickness, AOT*). Aunque este método utiliza variaciones relativas de reflectividad, también es capaz de determinar valores absolutos cuando la reflectividad de los píxeles usados no es constante.

Un espesor óptico más alto causa un incremento en la reflectividad de la superficie, pero este incremento depende de la reflectividad en cada pixel. La diferencia en el incremento de reflectividad debido a los aerosoles se utiliza para invertir el valor absoluto de la AOP. Sin embargo cuando dos adquisiciones sucesivas son obtenidas con idénticas AOP, este método es indeterminado, ya que si las reflectividades TOA de los días D y D+2 son idénticas, cualquier valor del espesor óptico proporcionará reflectividades de superficie idénticas.

Para solucionar este problema, se complica algo la función (figura 11.6):

Se busca la AOP del día D y del D + 2 con el fin de minimizar las diferencias entre las reflectividades de la superficie del día D y del día D+2 y también las diferencias con un conocimiento a priori de las reflectividades de superficie.

Las reflectividades a priori provienen de una iteración previa del algoritmo, por ejemplo con los días D-2 y D. Si la AOP del día D y del D + 2 son diferentes, el método trabaja como se ha indicado anteriormente, pero si no es así, el uso de reflectividades a priori, permite invertir el espesor óptico.

La reflectividad de superficie a priori, es obtenida aplicando correcciones atmosféricas a la primera imagen de la serie temporal con un espesor óptico

arbitrario. Se ha verificado que el algoritmo converge después de unas cuantas fechas.

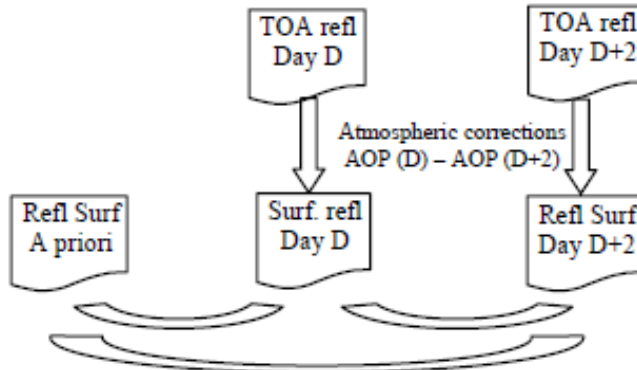


Figura II.6. Esquema de la versión actual de la función de inversión de aerosol

El modelo atmosférico que se utiliza es el Código de Dispersión de Órdenes Sucesivas (Deuze et al., 1989). Este código proporciona look-up tables (LUT) para calcular la reflectividad en la parte superior de la atmósfera en función de la reflectividad en superficie para diferentes valores de los siguientes parámetros:

- Propiedades de aerosoles (modelo de aerosol y espesor óptico).
- Ángulos solar y de visión.
- Longitud de onda.
- Altitud de la superficie.

Esta primera LUT se llama "Modelo atmosférico directo". En un segundo paso, estas tablas son invertidas para proporcionar reflectividades de superficie en función de reflectividades TOA para los mismos valores de parámetros anteriores. Esta inversión se realiza mediante un polinomio de tercer grado en los valores de la LUT ($r_{\text{surf}} = >r_{\text{TOA}}$) para cada combinación de los otros parámetros (AOP, ángulos, longitud de onda, altitud). Esta segunda LUT se llama "Modelo atmosférico inverso". El llamado "efecto de adyacencia" (Tanre et al., 1981), relacionado con la distorsión de las imágenes por la dispersión de la luz por la atmósfera no se ha abordado en este algoritmo.

II.5.4 Un procedimiento de normalización absoluta del NDVI

La mayor parte de los procedimientos descritos proporcionan reflectividades corregidas atmosféricamente. En la mayoría de las aplicaciones, los parámetros biofísicos de la cubierta vegetal se describen mediante relaciones basadas en esas reflectividades y en muchos casos, se utilizan combinaciones de esas bandas, como son los bien conocidos Índices de Vegetación, entre los que destaca el NDVI (Rouse et al, 1974).

El uso de series temporales consistentes de NDVI es un instrumento esencial para la descripción de los cambios que ocurren en la cubierta vegetal de la superficie terrestre (Van Leeuwen, 2006). El ciclo de crecimiento de los cultivos y de las fases correspondientes a sus diferentes estados fenológicos, son descritos por estas series temporales en una forma que ningún otro medio puede hacer. Aplicaciones como la discriminación entre diferentes cubiertas en función de su diferente patrón temporal, la estimación de parámetros biofísicos, incluyendo evapotranspiración y producción de cosechas se basan en este instrumento.

Los índices de vegetación en forma de cociente, como el NDVI, introducen una primera corrección del efecto atmosférico; sin embargo persiste la distorsión debido a que la interacción de la atmósfera es distinta según la longitud de onda y ancho de las bandas espectrales. Por ello, el procedimiento clásico es calcular el Índice de Vegetación desde las reflectividades corregidas atmosféricamente, según los procedimientos anteriormente descritos.

Sin embargo podría ser de interés, tanto metodológico como con fines de aplicaciones operativas, el desarrollo de un procedimiento de corrección que operara directamente sobre los valores del NDVI_TOA para obtener un NDVI de superficie, esto es NDVI_BOA, aplicable además a diferentes sensores, sin necesidad de realizar la corrección atmosférica banda a banda, que suele ser dependiente del sensor en cuanto al ancho de banda y respuesta espectral, lo que hace la tarea compleja.

En esta sección se propone un procedimiento de normalización absoluta que opera sobre el NDVI_TOA para obtener el NDVI_BOA, aplicable a observaciones realizadas desde cualquier sensor, siguiendo la línea de los procedimientos de normalización de superficies invariantes. El procedimiento

propuesto se evalúa sobre la constancia de sensores anteriormente mencionados.

II.5.4.1 Procedimiento de normalización basado en superficies invariantes

El procedimiento basado en superficies invariantes es ampliamente utilizado para la corrección banda a banda. Dichas superficies invariantes son áreas concretas de la imagen que presentan estabilidad radiométrica mantenida en el tiempo. Estas áreas deben ser además fácilmente distinguibles y abarcar los extremos del espectro radiométrico de los elementos de interés presentes en la imagen. Para la corrección banda a banda, se utilizan superficies no vegetadas, de desierto, nieve, y otras. En el caso más riguroso, cuando se tiene control radiométrico mediante equipos patrón para asegurar la invarianza, la técnica es usualmente llamada calibración vicaria. En este caso, se trata de una calibración radiométrica absoluta independiente del prelanzamiento y de las calibraciones a bordo del sensor (Vries et al, 2007).

La calibración vicaria basada en la reflectividad, es llevada a cabo comparando la radiancia medida por el sensor con las medidas tomadas in situ, atmosféricamente corregidas. Las variables atmosféricas y la reflectividad en el suelo se miden coincidiendo con el sobrevuelo del satélite, y son usadas como datos de entrada en un modelo de transferencia radiativa (como el algoritmo de transmisividad atmosférica de resolución espectral moderada MODTRAN) para predecir la radiancia que llega al sensor. Este valor se compara con valores de satélite para calcular un valor de ganancia (Dingirard & Slater, 1999).

En el caso de Vries et al (2007), en lugar de medidas coincidentes se utilizan estimaciones de las variables atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen y la reflectividad medida en el sitio. Este enfoque permite la calibración de sensores donde hay pocas o ningunas medidas coincidentes disponibles, como es el caso de Landsat MSS. En investigaciones anteriores de corrección radiométrica se ha utilizado un amplio rango de zonas pseudo-invariantes, manualmente y automáticamente seleccionadas para la normalización de imágenes (por ejemplo, Canty et al., 2004; Furby & Campbell, 2001). La homogeneidad radiométrica espacial y la estabilidad temporal de las zonas a seleccionar son cuestiones importantes a la hora de seleccionar zonas pseudo-invariantes para la calibración del sensor. Diversos autores (Cosnefroy et al., 1996) han presentado métodos para la selección de zonas invariantes y medidas de la variabilidad espacial y temporal. La estadística usada normalmente para

cuantificar la variabilidad, es el coeficiente de variación (CV). Generalmente se calcula utilizando imágenes de reflectividad o medidas de reflectividad superficial en el campo.

En estudios previos, las imágenes son normalizadas mediante superficies invariantes, banda a banda antes de calcular los índices de vegetación (Du et al, 2002). Sin embargo, Chen et al (2005), utilizan directamente los índices de vegetación correspondientes a suelo desnudo y vegetación densa como criterio de normalización para superficies forestales. Operando de esta forma, encuentra tres ventajas de aplicar directamente la normalización sobre los índices de vegetación: La primera es que los índices de vegetación están diseñados para combinar la información espectral procedente de varias bandas para representar mejor los cambios en superficie y facilitarán la selección de zonas invariantes de forma más minuciosa. La segunda es que reduce el volumen de datos del procesado y análisis y la tercera ventaja es que la normalización directa de los índices de vegetación pueden reducir los errores en comparación con los métodos tradicionales, ya que los errores se acumulan en el caso de calcular los índices usando bandas ya normalizadas (Chen et al, 2005). Los avances actuales de la corrección de índices de vegetación presentan otras ventajas frente a las correcciones banda a banda como son la mayor estabilidad temporal de los índices, la capacidad de los índices de vegetación (por ser una combinación de bandas) para reducir en un primer paso el efecto de la atmósfera, además de ser bastante intuitivos y por tanto útiles en la selección de superficies invariantes.

II.5.4.2 Procedimiento de Normalización Absoluta de NDVI_TOA

El procedimiento de normalización absoluta del NDVI_TOA que aquí se propone, en la línea apuntada por Chen et al (2005) es semejante en su concepto al de corrección banda a banda, y se basa en las siguientes hipótesis:

- 1.- Es posible encontrar superficies en la imagen cuyo NDVI es "casi" invariante en el tiempo, y que dichas superficies exhiben un rango de valores de NDVI_TOA que abarque una gama dinámica adecuada de valores. Como se menciona más adelante en el suelo desnudo y la vegetación fotosintéticamente activa muy densa representan bien estas superficies invariantes. Además en estas superficies es donde los efectos BRDF son menores debido a ángulos de iluminación y visión.

2.- Es posible conocer los valores “absolutos”, esto es de la superficie, del NDVI de dichas superficies invariantes, bien mediante medidas radiométricas en tierra o por otros procedimientos, aunque no sean coincidentes con el paso del satélite.

3.- Que el impacto de la atmósfera en el NDVI_TOA de los píxeles de una imagen o de un área de la imagen es tal que, puede ser descrito por una función lineal. Entonces la determinación de esa función lineal permitiría corregir el efecto atmosférico, lo que indica que, en cuanto al NDVI, una atmósfera es descrita unívocamente por una función lineal. Cambios sustanciales en la atmósfera –vapor de agua y aerosoles- de una parte a otra de la imagen requeriría establecer diferentes funciones y sus diferentes áreas de influencia, lo que no es abordado en este trabajo. Generalmente se considera que la atmósfera es la misma en el área de estudio, como es usual en las correcciones atmosféricas banda a banda.

La normalización absoluta propuesta, al igual que todas las otras correcciones atmosféricas anteriormente descritas, se aplicaría a imágenes o a zonas de esas imágenes libres de nubes y de las sombras que esas nubes pudieran proyectar.

Bajo estas hipótesis, es posible llevar los valores de NDVI_TOA a los valores NDVI de la superficie aplicando una función lineal. El procedimiento consistiría pues en:

- a) Identificar en la imagen las superficies invariantes.
- b) Obtener la ecuación lineal para cada imagen o zona de la imagen. Para ello se representarían los valores NDVI_TOA leídos en la imagen contra aquellos obtenidos mediante medidas radiométricas, en las superficies invariantes.

La medida en diferentes épocas mediante radiometría de campo indican que las mejores superficies NDVI-invariantes son: el suelo desnudo y las superficies densamente vegetadas con vegetación fotosintéticamente activa. También estas superficies están siendo utilizadas para la calibración vicaria de reflectividades (Teillet, 2001), indicando que el NDVI es el parámetro que mejor se comporta. La gran ventaja es que estas superficies representan justo los dos extremos del rango dinámico de valores de NDVI para la superficie terrestre.

En cuanto al suelo desnudo, en una zona como la nuestra correspondiente a un clima semiárido, es posible disponer de variados emplazamientos para su caracterización. Para el caso de la cubierta vegetal densa, la mejor cubierta encontrada, la cual presenta una mayor estabilidad temporal, es la correspondiente a una buena cubierta de alfalfa en su momento de máximo desarrollo.

II.5.4.3 Determinación de los valores absolutos de NDVI para superficies invariantes de suelo desnudo y vegetación muy densa.

En la Figura 11.7 se muestran los espectros característicos de la reflectividad para las dos superficies invariantes consideradas, suelo desnudo y vegetación densa. Asimismo se representan las funciones de respuesta espectral del sensor TM de Landsat 5. Los espectros estudiados deben integrarse en las bandas del sensor que se toma como referencia, Landsat 5-TM, por lo que las imágenes normalizadas serán comparables con este sensor.

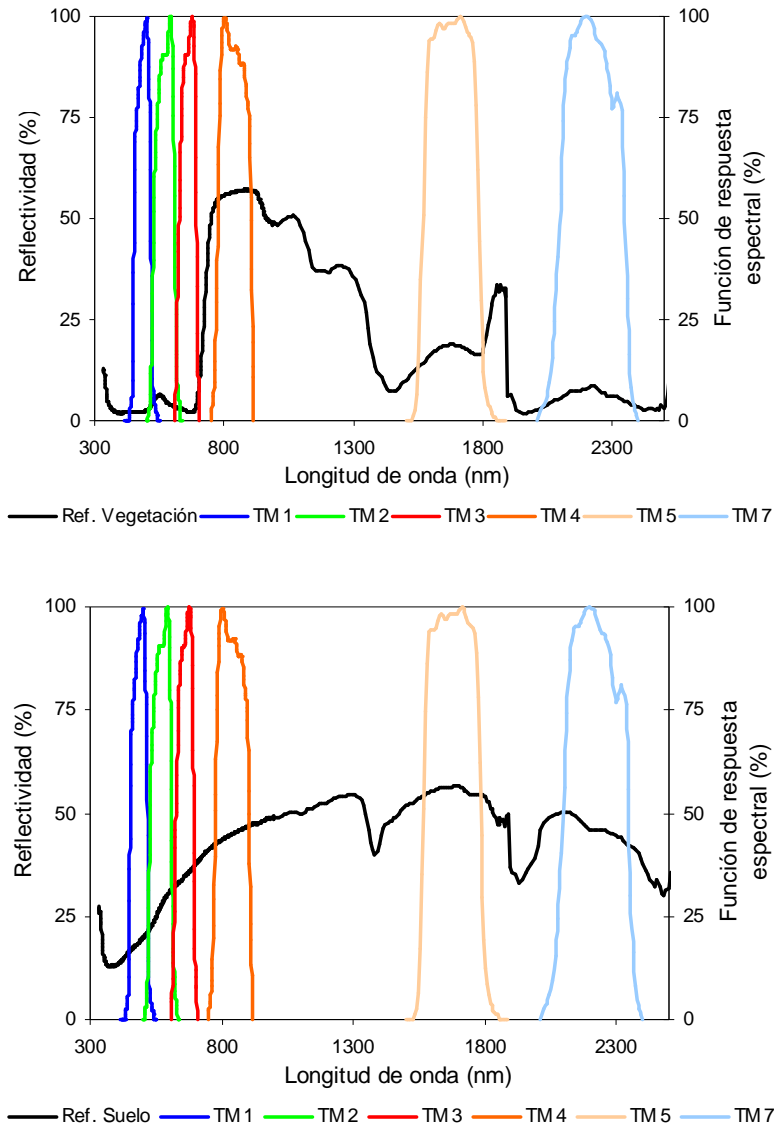


Figura II.7.- Espectros de reflectividad de suelo desnudo, arriba, y vegetación densa, abajo, junto con la función de respuesta espectral del sensor TM de Landsat 5.

La integración de los espectros de reflectividad junto con la respuesta del sensor en las bandas TM genera valores de NDVI promedio de 0.15 para el suelo desnudo tipo y 0.91 para la vegetación densa tipo. Estos valores son obtenidos para la zona de estudio y han de ser contrastados para otros tipos de suelo, ya que según el tipo de suelo, su color y contenido en humedad y materia orgánica pueden modificarlo ligeramente. De forma semejante hay que proceder con la cubierta de vegetación densa, por lo que los valores aquí señalados no pueden ser extrapolados de forma automática a cualquier otra zona y superficie. Se requiere su comprobación y validación previas.

Tras la selección cuidadosa de las superficies invariantes y conocida su respuesta espectral en superficie es necesario identificar las mismas en cada imagen de satélite a normalizar. Estas superficies no corresponden a localizaciones fijas en la imagen debido a la dinámica de la vegetación en el área de estudio. La localización de las parcelas de suelo desnudo responde al conocimiento de un amplio número de parcelas carentes de vegetación y sin cambios apreciables en la superficie, la selección de la vegetación densa debe realizarse a partir del conocimiento de los cultivos presentes en cada parcela y en cada fecha. Conocidos los valores de NDVI_BOA y los valores de NDVI_TOA en la imagen para esas zonas, se aplican funciones lineales (Du et al., 2002) particulares para cada fecha y sensor para normalizar la imagen completa. La idoneidad de la metodología de normalización en el seguimiento de cambios en la vegetación ha sido chequeada en numerosas ocasiones.

Para contrastar dicho procedimiento, hemos realizado la comparación de las imágenes de NDVI normalizadas con respecto a imágenes de NDVI derivadas de correcciones atmosféricas absolutas. Un ejemplo del resultado obtenido se muestra en la figura 11.8 para el caso de Landsat 7- ETM+ en la fecha del 20 de Mayo de 2003. Tal y como se puede observar en ella, la coincidencia es notable entre ambos productos, manifestándose en una fuerte correlación lineal para todo el rango de valores de NDVI obtenido mediante ambas metodologías, lo que avala el procedimiento utilizado, al menos en las imágenes analizadas.

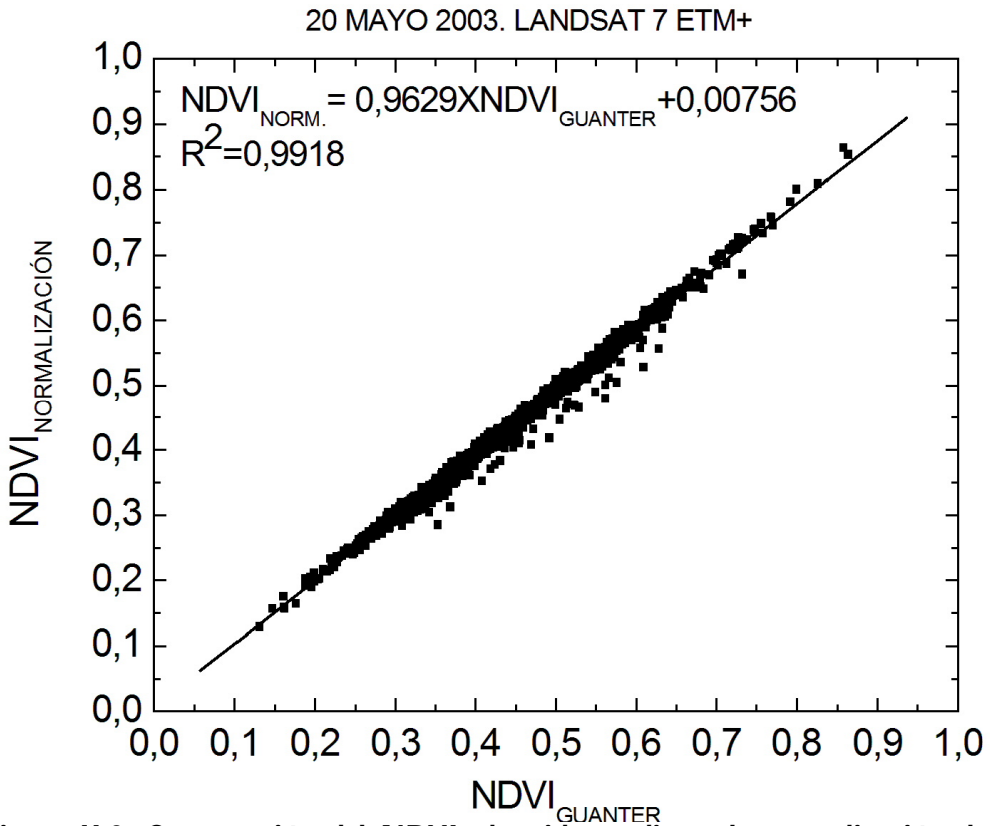


Figura II.8. Comparación del NDVI obtenido mediante la normalización de zonas invariantes y el NDVI corregido atmosféricamente para la fecha del 20 de Mayo de 2003.

La última parte del capítulo IV se dedica a hacer una comparativa del método de normalización frente a los métodos de corrección atmosférica absoluta. Para ello se comparan las imágenes de Landsat 5- TM y Landsat 7- ETM+ con MODIS y se evalúan los efectos de aplicar los diferentes métodos de corrección atmosférica anteriormente citados. En este caso, el análisis se realizará en 2 zonas diferentes.

En el capítulo V, se ha procedido a la comparación entre el NDVI_BOA y el NDVI_TOA, entre los sensores DEIMOS y FORMOSAT y DEIMOS y Landsat 7 procediendo con la metodología descrita en el capítulo III.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PARA LA COMPARACIÓN ENTRE SENSORES DE DIFERENTE RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL .

El objetivo en este capítulo es el estudio de la metodología de comparación entre sensores en lo que se refiere a las reflectividades espectrales y al NDVI. Se desarrolla pues un procedimiento para comparar reflectividades y NDVI entre diferentes sensores: Landsat5-TM, Landsat7-ETM+, IRS-LISS, NOAA-AVHRR, TERRA- ASTER, QuickBird y MODIS. Para ello llevaremos a cabo un análisis de la incertidumbre en la georreferenciación y los resultados de este efecto usando diferentes métodos de corrección geométrica. También se deriva un procedimiento mejorado (método de zonas homogéneas) que nos permitirá posteriormente derivar las ecuaciones de traslación entre sensores (además del desplazamiento de píxel ya aplicado inicialmente por Martínez et al. 2003). Los datos y métodos de procesamiento utilizados son descritos en el apartado III.2. El apartado III.3 se dedica a la metodología para la inter- calibración entre sensores.

Hay varias formas de llevar a cabo el estudio de la continuidad de datos y poder proporcionar ecuaciones de traslación entre sensores. El primer modo es usando los datos procedentes de un sensor de más alta resolución espectral para simular los datos de sensores de moderada resolución espacial (Steven et al. 2003; Miura et al. 2006; Gitelson and Kaufman 1998). La ventaja es que solamente interviene una atmósfera y no hay errores de georreferenciación,

aunque las funciones de respuesta espectral y la función de transferencia de modulación (*Modulation Transfer Function*, MTF) tienen que ser aproximadas (Huete et al, 2002).

La segunda forma es usando observaciones reales de satélites (Calera 2000; Martínez et al. 2003; Gallo et al. 2005; Teillet et al. 2001; Teillet et al. 2006; Takeuchi and Yasuoka 2004). En este caso, la ventaja es que al utilizar datos reales para establecer las ecuaciones de traslación, dichas ecuaciones resultantes incluirán todas las fuentes de incertidumbre. La principal desventaja es que el intervalo de tiempo entre la observación desde diferentes sensores sobre la misma zona pueden producir variaciones en los parámetros atmosféricos y del ángulo de iluminación solar y de observación.

Una variante de este segundo procedimiento, sería la utilización de datos reales de satélite con observaciones simultáneas procedentes de sensores aerotransportados. En trabajos anteriores, hemos realizado una comparación multiescala entre sensores con datos hiperespectrales del sensor aerotransportado DAIS (Calera et al, 2001) y una imagen sincrónica del sensor ETM+ como referencia. A pesar de la incertidumbre en la corrección atmosférica, encontramos relaciones lineales entre sensores y en diferentes fechas.

La línea de trabajo de esta tesis, es la comparación entre observaciones reales procedentes de diferentes sensores, con el objetivo de contribuir al conocimiento de las relaciones entre sensores que permitan trasladar reflectividades y NDVI de un sensor a otro. En general, evitaremos los efectos atmosférico y bidireccional usando imágenes sincrónicas o casi sincrónicas con observación cerca del nadir.

Los objetivos que se abordan son:

- (a) Explorar los efectos de la incertidumbre en la georreferenciación en las *observaciones entre sensores*.
- (b) Desarrollar y aplicar un método que permita comparar las observaciones entre sí para sensores de diferente resolución espacial en zonas homogéneas que nos permitirá derivar ecuaciones de traslación entre los diferentes sensores de nuestra constelación.
- (c) Desarrollar procedimientos prácticos para aplicaciones operacionales.

III.1 Intercomparación entre sensores

La obtención de relaciones entre sensores ha sido el objeto de diversos estudios (Steven et al. 2003; Röder et al. 2005; Miura et al. 2006; Teillet et al. 2006; Van Leeuwen et al. 2006). Cada uno de ellos se centra en diferentes aspectos con el fin de obtener imágenes multi- resolución, tanto espacial como temporal, para el análisis de los parámetros biofísicos.

Las diferencias entre las observaciones procedentes de sensores de diferente escala o en series de imágenes multi- temporales, pueden ser agrupadas en cinco diferentes causas:

a) Diferentes condiciones atmosféricas.

Como ha sido señalado anteriormente la presencia de la atmósfera influye en la energía reflejada que llega al sensor y por ende en el NDVI. Las correcciones atmosféricas señaladas en el capítulo II abordan este problema. La elección de imágenes sincronas o cuas-sincronas seleccionadas en este trabajo permitirá analizar el impacto de las diferentes correcciones atmosféricas en las observaciones.

.El efecto de las condiciones atmosféricas (dispersión de Rayleigh, ozono, espesor óptico de los aerosoles, contenido del vapor de agua) en los valores de reflectividad y NDVI, para cuantificar la incertidumbre en el NDVI aparente para cada sensor, así como la posibilidad de obtener las ecuaciones de traslación entre sensores para crear una serie temporal de NDVI, ha sido evaluado por otros autores, entre ellos, por Van Leeuwen et al. (2006).

Según Van Leeuwen et al. (2006), los diversos procesos asociados a la caracterización y las correcciones atmosféricas, introducen incertidumbre en la continuidad del NDVI, para trasladar los valores de NDVI de un sensor a otro. Por tanto los resultados concluyen que los usos actuales del NDVI entre sensores son beneficiosos si las correcciones atmosféricas, así como las ecuaciones de traslación, son convenientemente aplicadas.

El intentar obtener una corrección atmosférica precisa de las imágenes es un objetivo conocido debido a la usual falta de datos atmosféricos adecuados (vapor de agua y aerosoles, principalmente) en varios sitios. Además, los efectos atmosféricos se unen a otros efectos que describiremos a continuación, por ejemplo, los ángulos de iluminación solar y de visión, así como las diferentes

respuestas espectrales de los sensores. En algunas de las comparaciones realizadas en este trabajo nos referimos a la intercalibración de las reflectividades y el NDVI_TOA. Además, en este caso, los efectos atmosféricos son minimizados por el uso de imágenes sincrónicas o casi-sincrónicas.

b) Diferentes ángulos de iluminación solar y de visión.

Estas diferencias causan efectos bi-direccionales, normalmente descritos a través de la BRDF. Ambas condiciones influyen en la contribución atmosférica, normalmente de la misma manera (Holben, 1986) y además pueden ser aumentados por los efectos topográficos (Richter, 1997). En este trabajo, hemos intentado minimizar los efectos debidos a los diferentes ángulos de iluminación solar y de visión, evitando la necesidad de calcular la BDRF utilizando imágenes de satélites cerca del nadir.

c) Diferencias en las bandas espectrales.

Dichas diferencias surgen debido a las características de los diferentes sensores, como son el ancho de banda y las respuestas de las diferentes bandas espectrales, es decir la llamada "cuestión espectral" (Miura et al. 2006). Estos aspectos pueden ser aumentados por el efecto atmosférico y dependen del espectro de reflectividad de la superficie. Para un par de imágenes Landsat TM-ETM+, Teillet et al, (2001) encontró que los efectos debidos a las diferencias en las bandas espectrales, son más dependientes de la reflectividad del suelo que de las diferentes condiciones de iluminación o atmosféricas.

Los sensores sobre diferentes satélites miden con diferentes anchos de banda y tienen diferente respuesta espectral. Estas diferencias sistemáticas ocurren debido a que las diferentes bandas reciben diferentes componentes de la reflectividad de la vegetación y del suelo (Guyot and Gu, 1994). Diversos estudios fueron realizados sobre este asunto con resultados que difieren. Steven et al. (2003) obtuvo radiancias espectrales y NDVI por medio de la convolución de las funciones de respuesta espectrales de un rango de satélites para simular sus respuestas a partir de los mismos datos de medidas espectraloradiométricas sobre cubiertas vegetales.

En este caso, concluyen que el NDVI procedente de diferentes sensores puede ser intercalibrado por medio de relaciones lineales con una precisión de 1-2%. Miura et al (2006) aplica la convolución una imagen hiperespectral Hyperion de una zona heterogénea a bandas de reflectividad de AVHRR, MODIS

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aboard the Terra and Aqua satellites) y ETM+. A diferencia que Steven et al (2003), ellos encontraron que las relaciones entre sensores del NDVI y reflectividades no son ni lineales ni únicas. Las relaciones entre reflectividades muestran fuertes dependencias con la cobertura del suelo, mientras que las relaciones entre el NDVI no muestran este tipo de dependencias, pero no son tampoco lineales.

Estas diferencias pueden deberse a los efectos de la atmósfera y a la contribución de la reflectividad de la superficie a la diferencia de bandas espectrales. En este trabajo, presentamos datos observacionales que contribuyen a clarificar este asunto, particularmente en lo que se refiere a las condiciones de linealidad de las relaciones entre sensores del NDVI y reflectividades. La agregación de píxeles a un tamaño adecuado juega aquí un importante papel.

d) Efectos de georreferenciación.

En este caso, las diferencias provienen de la incertidumbre en la corrección geométrica de las imágenes. Cuando se combinan imágenes procedentes de diferentes sensores y con diferente resolución espacial, es necesario asegurarse de que es la misma superficie la que se está observando a través de toda la secuencia temporal de imágenes.

Este efecto empieza a ser todavía más fuerte cuando se incrementa la heterogeneidad de la zona en la escala de observación y puede aumentar también por los efectos topográficos. El impacto de la precisión en la georeferenciación es uno de los objetivos de este capítulo (Martínez et al., 2003; Martínez- Beltrán et al, 2009).

e) Calibración de los sensores.

Debido a la degradación del sensor con el tiempo o por otras causas, la calibración puede cambiar. Las reflectividades espectrales se obtienen a partir de la magnitud física, que es la radiancia, medida por el satélite, la cual solamente puede calcularse si la calibración del sensor es conocida. La incertidumbre en los parámetros de intercalibrado pueden introducir grandes diferencias entre las observaciones sobre una misma zona procedentes de diferentes sensores. Las comparaciones llevadas a cabo por simulación entre el NDVI calculado para diferentes parámetros de calibración para el mismo sensor y con la misma imagen muestran un comportamiento ligeramente no lineal (Calera, 2000),

debido a la no linealidad en la definición matemática de NDVI. Este efecto es inapreciable en el rango de NDVI sobre tierra y vegetación.

Por otro lado, con un par de imágenes simultáneas adquiridas de diferentes sensores, podemos usar una de ellas con coeficientes de calibrado conocidos, para asegurarnos la exactitud de la calibración del otro sensor si es posible excluir otras causas que producen esas diferencias.

Esta metodología de intercalibración fue aplicada por Teillet et al. (2001; 2006) a un par de imágenes procedentes de los sensores TM y ETM+, con el objetivo de calibrar el sensor TM usando ETM+ con similar exactitud en la obtención de reflectividades con la llamada calibración vicaria. Este mismo sistema es el que se está utilizando en la comparación entre Landsat 7- ETM+ y Landsat 8. El mismo procedimiento fue aplicado a TM y MSS por Röder et al. (2005). En este capítulo se aplica una similar metodología a un par de imágenes adquiridas casi simultáneamente para confirmar la validez de los nuevos coeficientes de calibrado para el sensor TM (Chandler and Markham 2003) para imágenes con fecha anterior a la de la publicación (al menos para imágenes de 2001).

f) Técnicas de agregación de reflectividades y NDVI.

La secuencia de pasos puede ser, calcular primero el NDVI a partir de las reflectividades (con las reflectividades calculadas a partir de las radiancias para cada pixel) y después calcular la media aritmética de NDVI (“agregación de NDVI”), o primero agregar las radiancias y después calcular el NDVI sobre las radiancias ya agregadas (“agregación de radiancias”). Rigurosamente, los mismos resultados pueden obtenerse únicamente en un proceso lineal, el cual no es el caso del NDVI (Justice et al. 1989). Sin embargo, estudios empíricos, muestran resultados similares cuando se aplican ambos procesos (De Cola, 1997; Fischer, 1994; Calera, 2000). En este trabajo, también se ha investigado sobre el mínimo número de píxeles requeridos para realizar la agregación de imágenes de sensores de diferente resolución espacial para dar resultados consistentes a lo largo de una serie temporal.

III.2 Imágenes utilizadas, de alta- media y baja resolución espacial, para la aplicación de nuestra metodología

La tabla III.1 suministra información acerca de las características de las imágenes utilizadas (pares de imágenes) que hemos utilizado para investigar la

continuidad y compatibilidad entre los diferentes sensores de alta y media resolución espacial. Todas las imágenes utilizadas cubren un amplio rango de valores de NDVI desde suelo desnudo a vegetación densa, ya en que las áreas que hemos seleccionado para este proceso hay un gran variedad de cultivos. Este aspecto es importante para la aplicación de nuestra metodología en zonas homogéneas (ver apartado III.3.2). Las diferentes comparaciones se llevan a cabo en varias fechas para así investigar la estabilidad temporal. En la tabla III.1 se muestran los diferentes pares de imágenes utilizados.

Tabla III.1.- Pares de imágenes utilizados en este trabajo, así como las fechas y horas de paso.

<i>Fechas</i>	<i>Pares de satélites / sensores</i>	<i>Hora de paso (Coordinated Universal Time, UTC)</i>
30/31 Mayo 2001	Landsat 7- ETM+ / Landsat 5 TM	10h 39.55' / 10h 23.96'
30 Mayo 2001	Landsat 7- ETM+ / NOAA16- AVHRR	10h 39.55' / 16h 35.68'
31 Mayo 2001	Landsat 5- TM / NOAA16- AVHRR	10h 23.96' / 16h 24.19'
17 Julio 2001	Landsat 7- ETM+ / NOAA16- AVHRR	10h 39.12' / 14h 44.95'
19 Agosto 2001	Landsat 5- TM / NOAA16- AVHRR	10h 30.33' / 14h 42.35'
05 Agosto 2002	Landsat 7- ETM+ / IRS LISS III-1D	10h 32.96' / 11h 07.47'
20 Mayo 2003	Landsat 7- ETM+ / QuickBird	10h 38.45' / 10h 51.20'
31 Julio 2003	Landsat 5- TM / QuickBird	10h 26.73' / 10h 49.75'
20 Mayo 2003	Landsat 7- ETM+ / Aster	10h 38.45' / 11h 02.83'
20 Mayo 2003	Landsat 7- ETM+ / Terra MODIS	10h 38.45' / 10h 30'
09/10 Julio 2004	Landsat 5- TM / Aster	10h 25.75' / 11h 06.78'
6 Marzo 2008	Landsat 5- TM / Terra MODIS	10h 40' / 10h 30'
29 Agosto 2008	Landsat 5- TM / Terra MODIS	10h 35.33' / 10h 30'

III.2.1 Cálculo y agregación de NDVI

El NDVI es calculado con las reflectividades de las bandas 3 y 4 (TM, ETM+), bandas 4 y 3 (IRS, QuickBird), bandas 2 y 3N (ASTER) y bandas 1 y 2 (MODIS). Para obtener los valores de NDVI en una zona que es mayor al tamaño de pixel individual, se pueden aplicar dos métodos, como ya discutimos en el apartado III.1 (f). En el primer proceso ("Agregación de NDVI"), el NDVI agregado se calcula como la suma de los valores individuales de NDVI. Donde el NDVI de cada pixel, $NDVI_k$, se calcula previamente usando las reflectividades en el infrarrojo cercano (NIR) y en el rojo (R) de acuerdo a la ecuación (3). En el segundo proceso ("Agregación de radiancias") se calculan primero las reflectividades agregadas sobre la zona del infrarrojo cercano (NIR) y en el rojo (R) y después se obtiene el NDVI sobre esos valores de reflectividades ya agregadas.

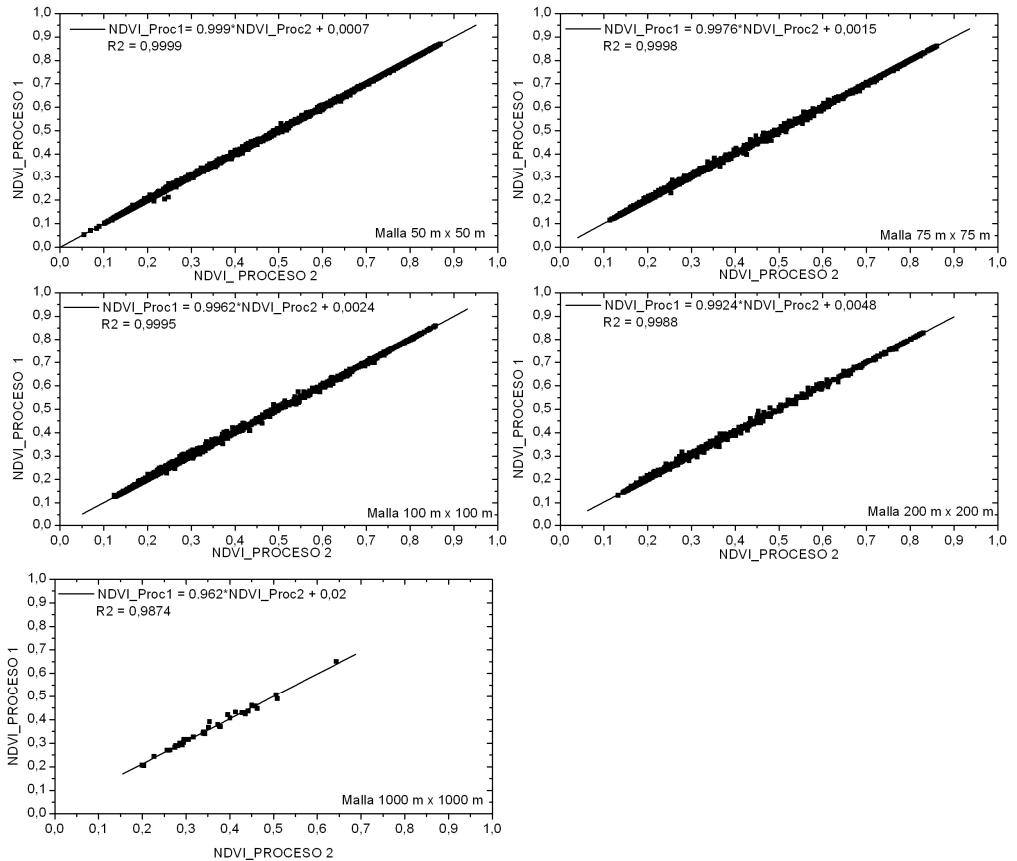


Figura III.1. Relación obtenida entre la "Agregación de NDVI" (Proceso 1) frente al "NDVI obtenido de "Radiancias agregadas" (Proceso 2), para cinco diferentes tamaños de malla

Se han chequeado ambos procesos para obtener el NDVI de diferentes píxeles y a diferentes escalas de agregación espacial. La relación obtenida entre la "Agregación de NDVI" frente al "NDVI obtenido de radiancias agregadas" de una imagen, muestra muy buen ajuste a la línea 1:1, con un coeficiente R^2 alrededor de 0.99, aunque alrededor de dicha línea 1:1 aparece un ligero ruido (figura III.1)

En este trabajo, se aplica el primer método y por tanto, el primer paso es calcular el valor de NDVI de los píxeles individuales:

$$NDVI_j = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} \quad (5)$$

Después se calcula el NDVI agregado:

$$\overline{NDVI} = \left(\sum NDVI_j \right) / n \quad (6)$$

donde n es el número de píxeles agregados.

III.3 Metodología aplicada para la intercomparación entre sensores

Para combinar información espacial procedente de diferentes sensores, es necesario establecer las observaciones con una malla con referencia a una zona geográfica común a todos ellos. Debido al diferente tamaño de píxel de cada sensor, la agregación espacial se efectúa para obtener un tamaño de celda común integrando un número diferente de píxeles de cada sensor. Durante este proceso de agregación, los datos originales se reducen a un número menor de píxeles para la misma extensión espacial. Como resultado, cada unidad agregada representa un área mayor que los píxeles originales. La agregación está con frecuencia referida a una resolución espacial más gruesa. La agregación espacial con frecuencia se utiliza para ampliar la escala (*up-scaling*) en análisis medioambientales. Los datos que disponemos de una mayor resolución espacial, tiene que agregarse para representar las características espaciales a las correspondientes escalas (Bian and Butler 1999).

Este es el caso cuando imágenes multiescala se utilizan para el seguimiento de la cobertura vegetal, combinando imágenes de baja resolución espacial pero alta frecuencia temporal con imágenes de alta resolución espacial pero baja frecuencia temporal.

Hay que recordar que este procedimiento para comparar las observaciones de diferentes sensores y analizar la compatibilidad entre dichos sensores, es una aplicación práctica más que un análisis de la señal del sensor. Por este motivo, no nos centraremos en las diferencias obtenidas como resultado de las distintas características del sensor, como son el ancho de banda y la respuesta espectral (como es el caso, por ejemplo de Steven et al. 2003; Miura et al. 2006).

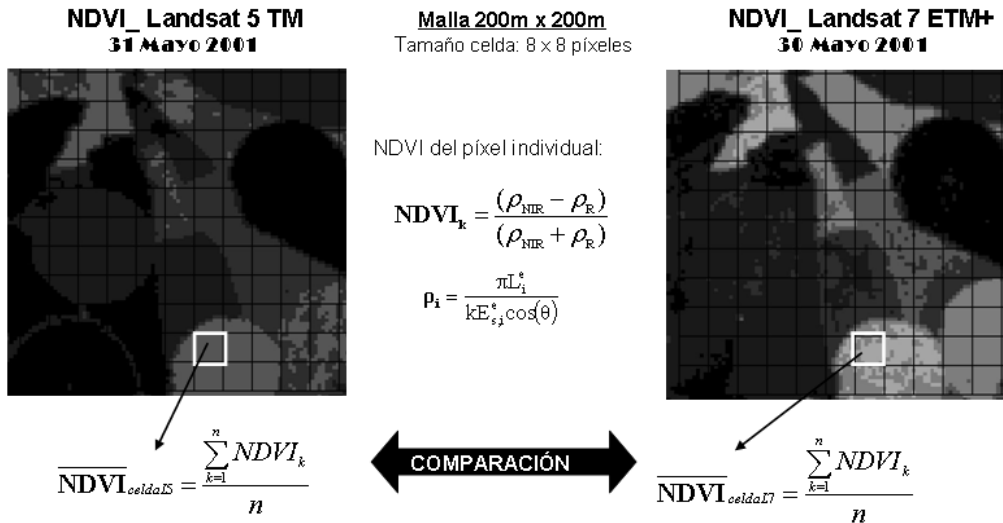
El procedimiento que se ha llevado a cabo es el siguiente (ver figura III.2):

(1) Se establece una malla sobre la zona común de un par de imágenes, donde cada celda de la malla define el nuevo tamaño del píxel de nuestra constelación virtual, es decir, la superficie a la cual los píxeles de la imagen inicial son agregados en cada caso. La longitud de cada celda determina el número de píxeles individuales para ser agregados. Para Landsat, IRS y QuickBird, los tamaños de celda seleccionados son: 25 m × 25 m, 50 m × 50 m, 75 m x 75 m, 100 m × 100 m y 200 m × 200 m, con el fin de acomodar un número entero de píxeles (por ejemplo, para Landsat e IRS, 1, 4, 9, 16 y 64, respectivamente). Para la comparación entre Landsat y MODIS, los tamaños de celda seleccionados son: 250 m × 250 m, 500 m × 500 m, 1000 m x 1000 m, con el fin de acomodar un número entero de píxeles (para MODIS, 1, 2, y 4 y para Landsat, 10, 20 y 40 respectivamente).

Se va a utilizar una serie de mallas para llevar a cabo la comparación a diferentes escalas espaciales. El origen de las diferentes mallas es el mismo en todos los casos para cada una de las imágenes y sensores. El proceso se ha implementado en un Sistema de Información Geográfica que es Arc View 3.2.

(2) El cruce de cada una de las mallas sobre el mapa de reflectividades o NDVI obtenido de cada una de las imágenes, va a permitir obtener de cada celda el valor agregado de cada parámetro y para cada sensor.

(3) Cada intersección entre la malla y las diferentes imágenes va a producir diversas tablas con los datos estadísticos correspondientes a la agregación para cada una de las celdas de la malla, como son el valor mínimo, valor medio y desviación estándar. En este caso, se compara el valor medio del NDVI de ambos sensores correspondiente a cada celda.



Donde n es el número de píxeles individuales promediados en cada celda de la malla. En este ejemplo **n=64**.

Figura III.2. Proceso para comparar las observaciones procedentes de diferentes sensores con diferente resolución espacial: Se muestra un ejemplo para Landsat7-ETM+ y Landsat5-TM+ (Martinez et al. 2003) para la malla de 200 m x 200 m. La intersección entre la malla y las reflectividades o el NDVI nos permite obtener para cada celda de la malla el valor medio de los 64 píxeles intersectados de cada sensor.

Una vez aplicada esta metodología y de cuyos resultados se muestran un ejemplo en la figura III.3, observamos la reducción de la dispersión conforme se incrementa el tamaño de agregación espacial y cómo mejora el ajuste lineal. Claramente, también puede verse como el coeficiente de correlación se acerca al valor unidad. Por encima del mínimo tamaño de agregación espacial de 3 x 3 píxeles, los coeficientes de la ecuación lineal y en particular el coeficiente de correlación espacial empiezan a estabilizarse. Sin embargo, el tamaño de agregación espacial adecuado debería ser de 5 x 5 píxeles de cada sensor.

30/31 Mayo 2001

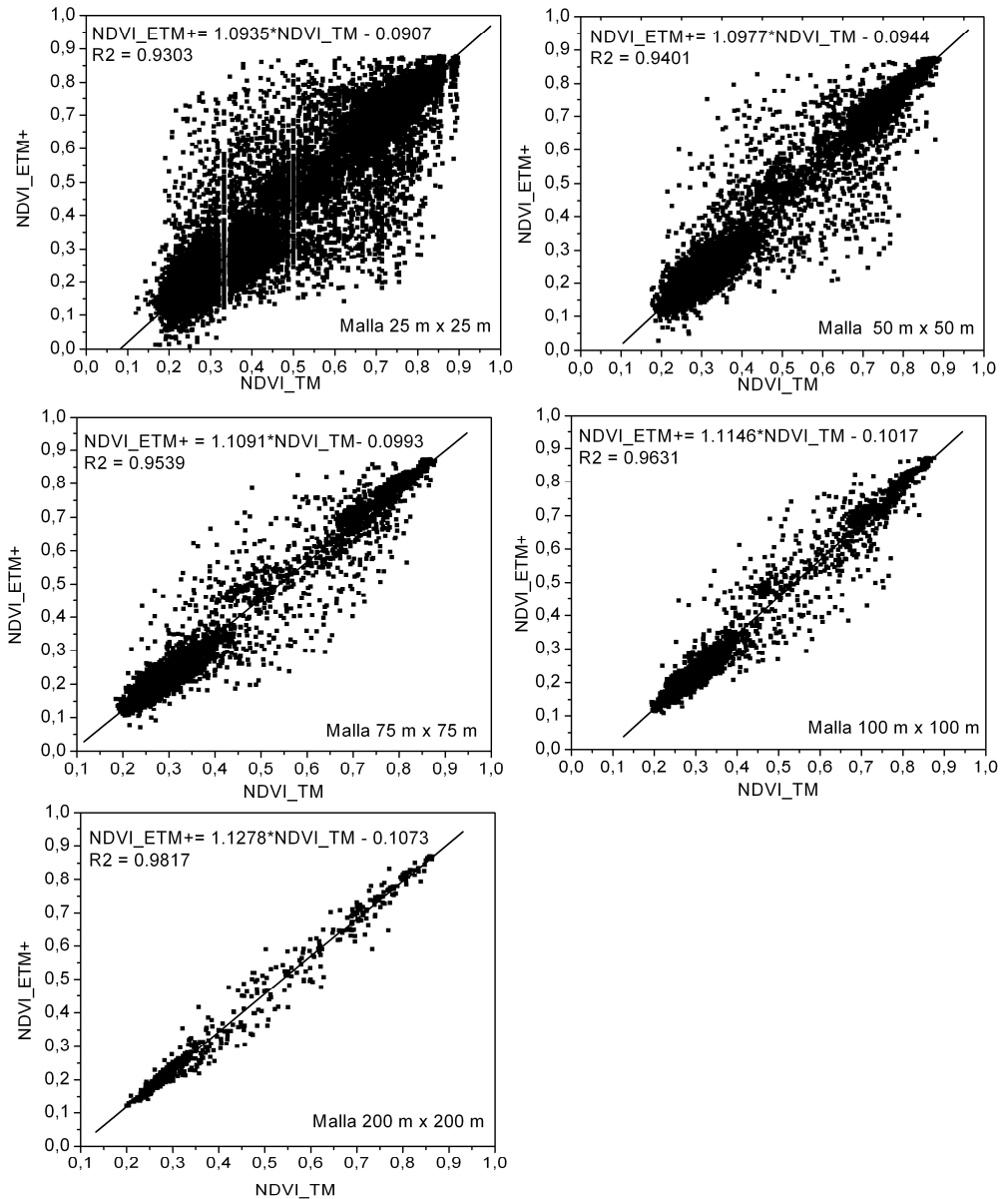


Figura III.3. Comparación del NDVI de TM (31 Mayo 2001) con ETM+ (30 Mayo 2001) para cinco tamaños de malla diferentes.

A continuación se van a analizar las posibles fuentes causantes de la dispersión de datos, que no sean las debidas a los propios sensores. Para ello se realizan dos tests, uno de ellos para analizar el error cometido en la toma de puntos de muestreo y por tanto se comete un fallo en la precisión geométrica y el otro para analizar el método de remuestreo aplicado.

III.3.1 Efectos de la incertidumbre en la georreferenciación: tests de hipótesis

La dispersión que se encuentra en la comparación entre sensores, y su reducción conforme se incrementa el tamaño de la agregación, puede deberse bien a diferencias en los sensores, bien a la incertidumbre de la georreferenciación. Al objeto de estudiar este último efecto se han llevado a cabo dos test que introducen cambios en la georreferenciación de la misma imagen. En el primer test (*test del pixel desplazado*), lo que se hace es simular el error de georreferenciación desplazando el pixel un valor establecido, en concreto medio pixel. La segunda demostración es llevada a cabo georreferenciando la misma imagen dos veces, pero utilizando dos métodos diferentes (convolución cúbica y vecino más próximo), aunque utilizando los mismos puntos de control (GCPs).

El *test del pixel desplazado* (Martínez et al, 2003), que se aplica sobre la imagen de 30 de Mayo de 2001, se basa en obtener un par de imágenes derivadas de la misma imagen original. Esta pareja de imágenes se genera desplazando la imagen original medio pixel, y por tanto lo que tratamos es de simular el error de georreferenciación. El orden de magnitud de este error ha sido generalmente aceptado. La metodología que se aplica en este caso es la misma que cuando se realiza la comparación entre diferentes sensores. El comportamiento en la dispersión de los datos (figura III.4) es similar a cuando se han comparado imágenes casi- sincrónicas procedentes de diferentes sensores (capítulo IV). Obviamente, la relación lineal ajusta bien a la línea 1:1 a todas las escalas de agregación, ya que, aunque desplazadas, la imagen original es la misma en ambos casos.

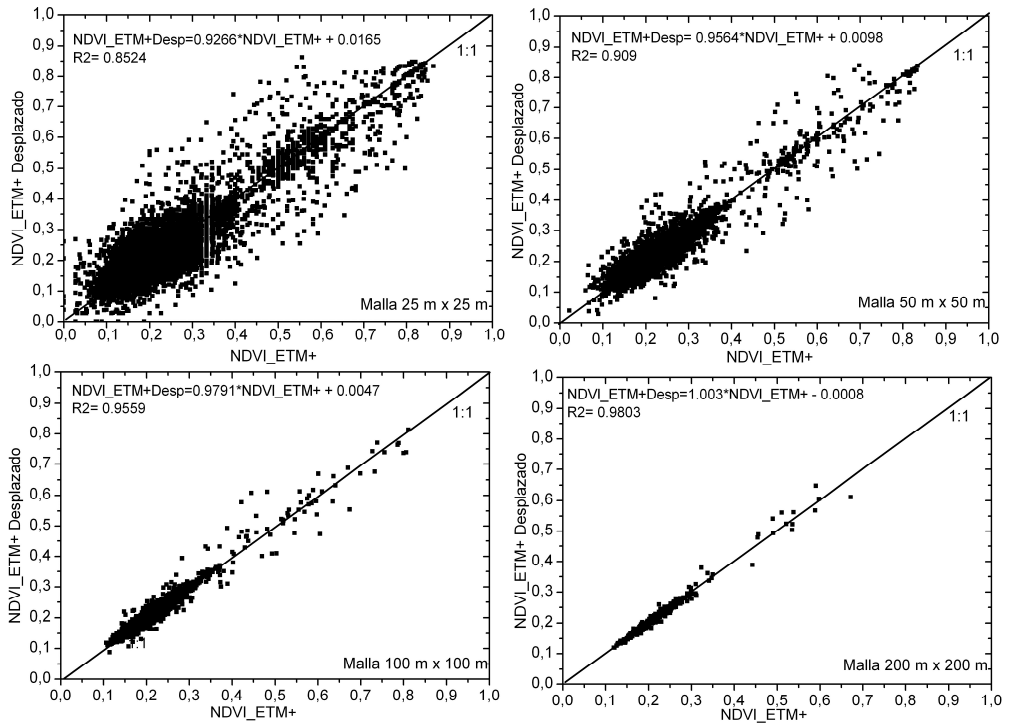


Figura III.4. Imagen de NDVI de Landsat 7-ETM+ desplazada 0.5 pixel vs. la misma imagen pero sin desplazar, para cada tamaño de malla de 30 Mayo 2001.

En el segundo test, se comparan un par de imágenes que han sido generadas de la misma imagen TM inicial, pero georreferenciadas con dos métodos distintos, convolución cúbica y vecino más próximo, utilizando en ambos casos los mismos puntos de control (figura III.5). En este caso, podemos observar un buen acuerdo a todas las escalas (La línea de regresión 1:1 pasa por el origen, coeficiente de correlación es cercano a 1) y un similar comportamiento en la dispersión de los datos a los previos análisis realizados con el desplazamiento de medio píxel y con pares de imágenes casi- sincrónicas procedentes de diferentes sensores.

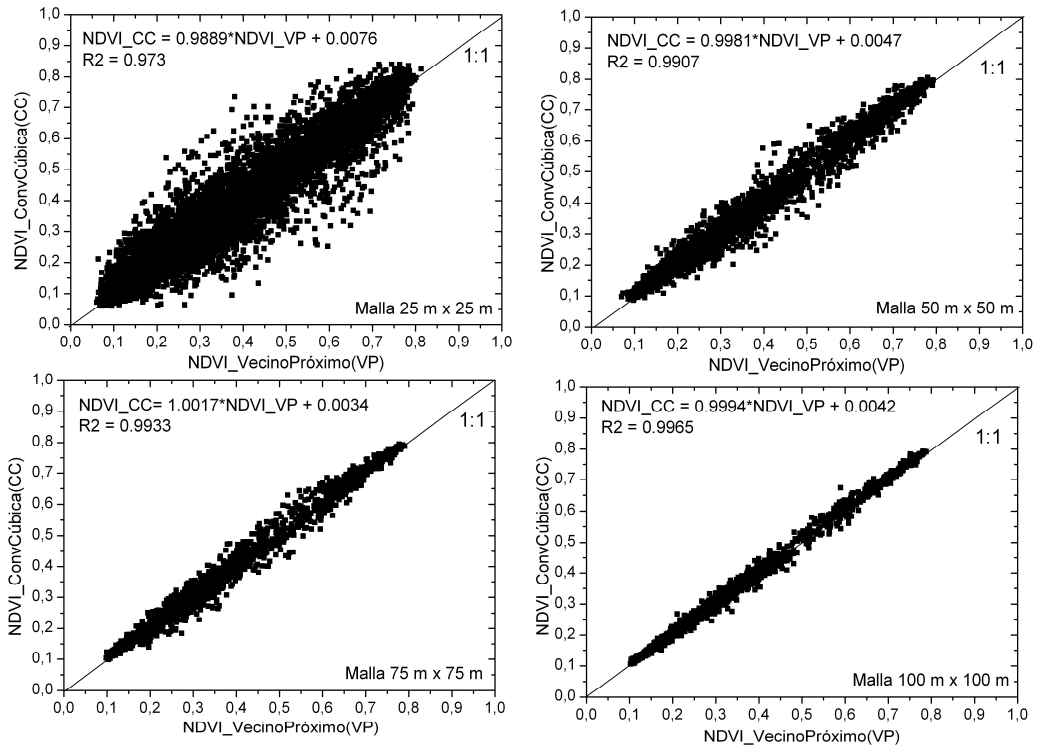


Figura III.5. Comparación de la imagen Landsat 5 TM (8 Julio 2003) georreferenciada dos veces con diferentes métodos, vecino más próximo y convolución cúbica, pero utilizando los mismos puntos de control. La línea de tendencia da la relación 1:1.

En esta figura III.5 se puede comprobar que, por ejemplo, para la malla de 50 m x 50 m (es decir, la agregación de 2 x 2 píxeles), un valor de NDVI de 0.4 con el método de vecino más próximo, NDVI_VecinoPróximo, puede estar en el rango de 0.3–0.5 con el método de convolución cúbica, NDVI_ConvCúbica. Para los mismos valores y una malla de 100 m x 100 m, los valores NDVI_ConvCúbica varían entre 0.35 to 0.45. Por lo que, por los resultados obtenidos, se podría concluir que el procedimiento de remuestreo no afecta significativamente a la ecuación de traslación que se va a generar.

Al igual que cuando se utilizan diferentes métodos de corrección geométrica, al aplicar un desplazamiento a la imagen de 0.5 píxel y compararla con la imagen original, se generan similares resultados y el mismo grado de dispersión que

cuando comparamos dos sensores diferentes. Esto confirma la hipótesis de que la incertidumbre en la georeferenciación introduce dispersión en zonas heterogéneas. La forma elipsoidal de la dispersión de los datos insinúa una mayor dispersión en zonas mixtas y no homogéneas, con valores de NDVI de rango medio, donde un cambio de la composición de la zona puede producir un gran cambio en los valores de NDVI. Por otro lado se ha analizado el origen de la dispersión que se muestra en la figura III.5 utilizando la herramienta "slicing" del software ENVI. Esta herramienta permite identificar sobre la imagen los puntos que presentan una mayor dispersión. El resultado indica que estos puntos corresponden en su mayor parte a bordes en las zonas heterogéneas y esencialmente corresponden a errores de georeferenciación. Por ello es de esperar que esta dispersión dependa tanto de la resolución espacial del sensor como de la heterogeneidad de la superficie.

Conforme el tamaño de agregación se incrementa, el efecto de la heterogeneidad disminuye y por tanto la dispersión, hasta estabilizarse en tamaño de agregación típico. Tanto en las gráficas anteriores como en los resultados mostrados en el capítulo IV, se observa como la estabilización de los resultados ocurre alrededor del tamaño de agregación entorno a 50-75 m para imágenes Landsat. Por tanto, se podría indicar que el tamaño mínimo de agregación espacial requerido es de 3x3 píxeles del sensor de menor resolución espacial. Para sensores de la misma resolución espacial, el tamaño mínimo de agregación requerido sería típicamente de 5x5 píxeles. Es de notar que estos tamaños de agregación dependerán de la calidad de la georeferenciación, y son válidos para imágenes corregidas geoméricamente con un error inferior al medio pixel.

Esto implica que la incertidumbre en la georeferenciación "degrada" la resolución espacial del sensor, bien a efectos de comparación con otros sensores, bien para el seguimiento temporal de una cubierta vegetal por un mismo sensor. Por ello, la resolución espacial efectiva de un sensor para el seguimiento temporal de la cubierta sería entre 3x3 y 5x5 píxeles. Para el caso típico de las imágenes Landsat, cuyo resolución espacial nominal es de 30x30m, la resolución "efectiva" para el seguimiento temporal sería alrededor de 100 m x 100 m (1 hectárea)

III.3.2 Método de zonas homogéneas

Como ya se ha concluido anteriormente, parece ser que la principal causa de la dispersión de los datos en la ecuación de traslación entre sensores, es la incertidumbre en la georreferenciación de la imagen para zonas heterogéneas. Con el fin de corroborar las sospechas se han definido una serie de zonas homogéneas, con un solo cultivo en cada una de ellos, evitando de esta manera los efectos de borde. Este método ya fue aplicado por Martínez et al. (2003), donde se aplicó este método con imágenes TM-ETM+ pero usando los antiguos coeficientes de calibrado para TM. En este caso se ha desarrollado este método para proporcionar las ecuaciones de traslación entre sensores que no están afectadas por errores de georreferenciación.

Para el par de sensores TM-ETM+ (TM con los coeficientes de calibrado indicados en el capítulo II, tabla II.2), se ha obtenido un coeficiente de correlación próximo a la unidad y similares coeficientes de la ecuación lineal para todos los tamaños de mallas (tabla III.2 y figura III.6). También se ha comprobado este *método de zonas homogéneas* en el *test del pixel desplazado* y de igual manera la dispersión se reduce en todas las escalas de agregación. Una condición muy importante para la calidad de los resultados es la apropiada selección de las zonas homogéneas con un solo cultivo. Para ello, se necesita que dichas zonas homogéneas cubran el rango completo de los valores de NDVI que se encuentran en la imagen.

Tabla III.2. Ecuaciones lineales para las reflectividades y NDVI procedentes de TM vs. ETM+ (representados por V_{TM} y V_{ETM+}), para zonas homogéneas y para el tamaño de agregación de 100 m x 100 m.

<i>Variable V</i>	<i>Coefficientes de la ecuación lineal</i> $V_{ETM+} = a \times V_{TM} + b$		<i>Coefficiente de correlación</i>
	a	b	R²
Reflectividad B1	0.8804	+0.0088	0.99
Reflectividad B2	0.9858	- 0.0088	0.99
Reflectividad B3	1.0265	- 0.0071	0.99
Reflectividad B4	1.0555	+0.0093	1.00
Reflectividad B5	1.0619	- 0.0116	1.00
Reflectividad B7	0.8987	- 0.0111	0.99
NDVI	1.0336	+0.0128	1.00

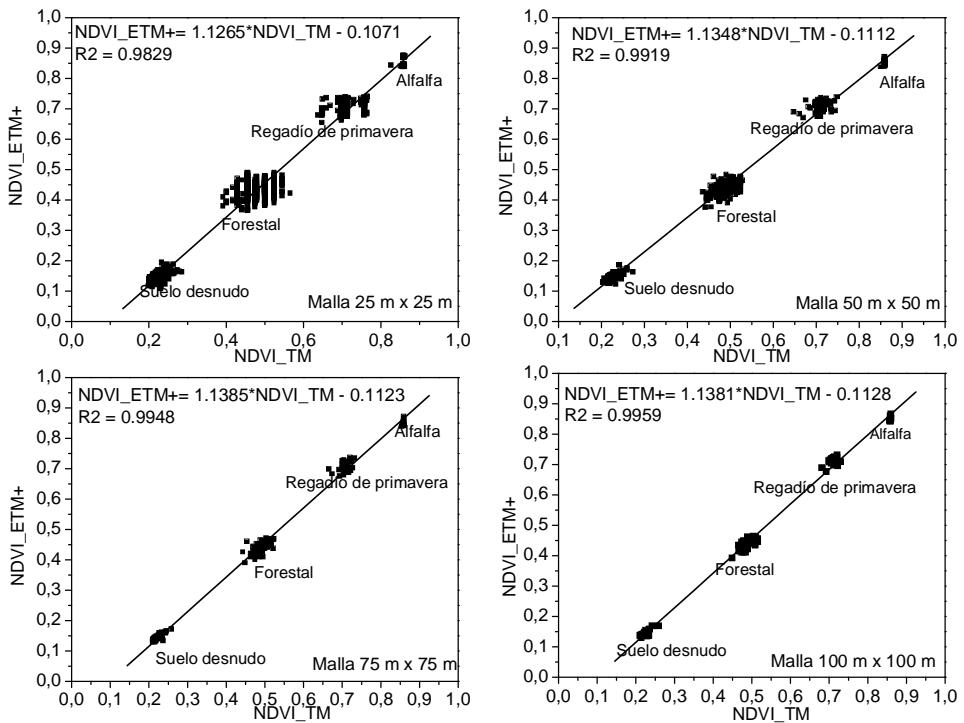


Figura III.6. Comparación de TM (31 Mayo 2001) con ETM+ (30 Mayo 2001) para zonas homogéneas y para cuatro diferentes tamaños de agregación. Las parcelas seleccionadas pertenecientes a un único cultivo son suelo desnudo, forestal, regadío de primavera y alfalfa.

El uso de superficie completamente vegetadas para el estudio de las inter-comparaciones entre sensores fue originalmente desaconsejado por Teillet et al. (2001), a menos que se tengan disponibles espectros de reflectividad de superficie. Sin embargo, Teillet et al. (2006), publicaron nuevos resultados, donde sí muestran la posibilidad de usar estas superficies para realizar la inter-comparación, incluso sin tener medidas coincidentes de la superficie.

Este *método de zonas homogéneas* ha sido aplicado a otros pares de sensores como ETM+- QuickBird y ETM+- Aster, y los resultados obtenidos se muestran en el capítulo IV. Sin embargo en el caso de MODIS, la aplicación de este método mostraría limitaciones por las dificultades que tendríamos para encontrar parcelas extensas con una única cubierta vegetal debido a la resolución de este sensor.

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA COMPARACIÓN ENTRE SENSORES DE ALTA- MEDIA Y SENSORES DE BAJA RESOLUCIÓN ESPACIAL.

En este capítulo se aplica el procedimiento desarrollado en el capítulo III para comparar reflectividades y NDVI entre diferentes sensores: Landsat5-TM, Landsat7-ETM+, IRS -1D LISS III, NOAA 16-AVHRR, TERRA ASTER y QuickBird. También se aplica el *método de zonas homogéneas* para derivar las ecuaciones de traslación entre sensores. En base a los resultados obtenidos, se analizan los errores en la calibración de los sensores (TM, ASTER) y se demuestra la necesidad de actualizar los nuevos coeficientes de calibración para TM anteriormente a la fecha en que éstos se publicaron (Chandler and Markham 2003) y al menos desde el año 2001 hacia delante, tal y como se viene haciendo rutinariamente en la actualidad.

Posteriormente se incluirá una discusión de las relaciones lineales obtenidas entre los diferentes pares de sensores, un estudio de los efectos de incertidumbre de geolocalización y su mitigación y de la estabilidad temporal de nuestras ecuaciones lineales. Las conclusiones y recomendaciones están resumidas en el apartado IV.4. En esta primera parte del capítulo, la comparación entre los diferentes sensores se hace a través de las reflectividades y NDVI de las imágenes usando imágenes sincrónicas o casi sincrónicas sin corregir atmosféricamente.

La segunda parte de este capítulo se dedica a hacer una comparativa del método de normalización frente a los métodos de corrección atmosférica absoluta. Para ello se comparan las imágenes de Landsat 5- TM y Landsat 7- ETM+ con MODIS y evalúan los efectos de aplicar los diferentes métodos de corrección atmosférica anteriormente citados.

IV.1 Sensores de alta- media resolución. Resultados y discusión.

Los resultados de la comparación entre las observaciones procedentes de los pares de sensores se van a presentar en gráficas de dispersión donde se representan los datos de reflectividad y NDVI de un sensor frente al otro, incluido el ajuste lineal, el cual va a dar las ecuaciones de traslación entre sensores. Todas las comparaciones son llevadas a cabo para cinco diferentes tamaños de agregación, con las reflectividades de todas las bandas así como para el NDVI (de todas estas comparaciones se muestran principalmente los resultados obtenidos para el NDVI por razones que más adelante se explicarán).

Debido a sus excelentes características de calibración, se va a utilizar el sensor ETM+ como el sensor de referencia en todas estas comparaciones. El punto de partida ha sido la comparación entre TM-ETM+ y posteriormente se extenderá esta metodología a otros pares de sensores pertenecientes a la constelación multisensor (LISS, QuickBird, ASTER, AVHRR, MODIS), primero para una única fecha, y después para varias fechas para investigar la estabilidad temporal. En la tabla III.1 ya se mostraron los diferentes pares de imágenes utilizados.

IV.1.1 Comparación de TM vs ETM+

Esta comparación se basa en el uso de pares de imágenes casi- sincrónicas de Landsat ETM+ (30 May 2001) y Landsat 5 TM (31 May 2001). En la figura IV.1 se muestran las gráficas de la reflectividad de la banda 1 (columna de la izquierda) y el NDVI (columna del centro). En la tabla IV.1 se indican las correspondientes ecuaciones lineales y el coeficiente de correlación obtenidos para las reflectividades de cada banda y para el NDVI.

Se puede observar que en cada tamaño de agregación, la forma del ajuste lineal es bastante similar para las reflectividades y el NDVI, por lo que las ecuaciones de traslación van a ser también similares (Tabla IV.1). Sin embargo, los valores de NDVI presentan una menor dispersión que las reflectividades, lo cual se indica por un mayor coeficiente de correlación (Tabla IV.1).

Esto significa que el NDVI es el parámetro que permite la mejor comparación entre diferentes sensores por medio de una ecuación lineal. A continuación, se muestran las gráficas de dispersión para el NDVI, y las ecuaciones para ambos, reflectividades y NDVI.

IV.1.1.1 Calibración de TM vs ETM+: Nuevos coeficientes de calibrado para Landsat 5 TM

Lo más destacado que se puede observar en la figura IV. 1a- b (columnas izquierda y central) es que la línea del ajuste lineal está, al menos, desplazada un 10% respecto de la línea 1:1 y no pasa por el origen. Como ya se revisó en el apartado III.1 (capítulo III), entre las posibles causas de las diferencias entre sensores están los errores de calibración. Chander and Markham (2003) publicaron nuevos coeficientes de calibración para TM, afirmando que "este cambio mejorará la exactitud de la calibración, la consistencia en el tiempo y la consistencia con Landsat 7- ETM+".

La modificación del procedimiento de calibración fue implementado por Eurimage para todos los productos de TM procesados después de 5 de Mayo de 2003 (Eurimage 2006). Sin embargo, en este trabajo se ha investigado sobre la posibilidad de que estos nuevos coeficientes necesitaran ser ya aplicados a imágenes con fechas anteriores a ésta. En la figura IV.1c (en la columna derecha) se muestran las gráficas de dispersión de la dispersión de TM-ETM+ después de volver a procesar las imágenes de TM con los nuevos coeficientes de calibrado. En este caso, la línea de la regresión se ajusta a la línea 1:1 además de pasar por el origen, lo que significa una excelente compatibilidad entre los dos sensores.

Tabla IV.1. Ecuaciones lineales para las reflectividades (bandas 3, 4 y 5) y NDVI procedentes de TM vs. ETM+ (representados por V_{TM} y V_{ETM+}). Se han usando los coeficientes de calibrado para TM mostrados en la tabla II.2) y para cinco diferentes tamaños de agregación.

<i>Variable V</i>	<i>Malla</i>	<i>Coefficientes de la ecuación lineal</i>		<i>Coefficiente de correlación</i>
		$V_{ETM+} = a \times V_{TM} + b$		
	<i>Lado pixel (m)</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R²</i>
Reflectividad B3	25	0.9076	+0.0175	0.79
	50	0.9470	+0.0092	0.84
	75	0.9824	+0.0185	0.79
	100	1.1006	-0.9038	0.79
	200	1.0750	-0.0178	0.96
Reflectividad B4	25	0.8396	+0.0595	0.72
	50	0.8760	+0.0417	0.77
	75	0.9290	+0.0315	0.82
	100	0.9579	+0.0224	0.85
	200	1.0583	- 0.0091	0.93
Reflectividad B5	25	0.8863	+0.0377	0.78
	50	0.9193	+0.0259	0.83
	75	0.9479	+0.0156	0.82
	100	0.9598	+0.0115	0.90
	200	1.0079	- 0.0059	0.96
NDVI	25	1.0064	-0.0221	0.93
	50	1.0059	-0.0203	0.94
	75	1.0016	-0.0105	0.96
	100	1.0183	-0.0159	0.96
	200	1.0325	-0.0110	0.98

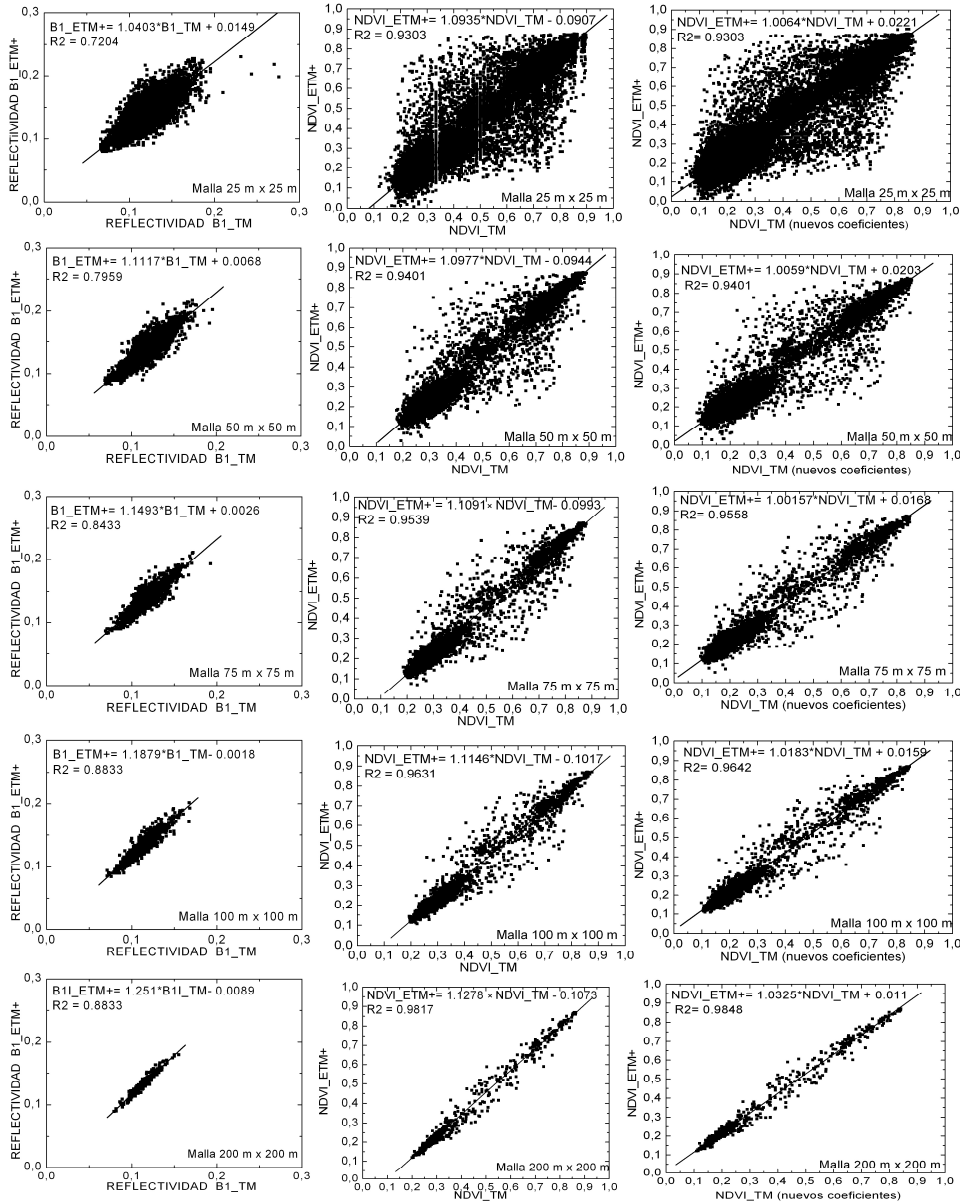


Figura IV.1. Comparación de TM (31 Mayo 2001) con ETM+ (30 Mayo 2001) para cinco diferentes tamaños de malla: (a) Reflectividad de banda 1, B1 (B1_ETM+ vs. B1_TM); (b) NDVI (NDVI_ETM+ vs. NDVI_TM); (c) NDVI con los nuevos coeficientes de calibración de TM dados en la Tabla IV.1 (NDVI_ETM+ vs. NDVI_TM nuevos coeficientes).

IV.1.1.2 Efecto de la agregación espacial

La segunda observación destacada en la figura IV.1 es la reducción de la dispersión conforme se incrementa el tamaño de agregación espacial y cómo mejora el ajuste lineal. Claramente, también puede verse como el coeficiente de correlación se acerca al valor unidad. Por encima del mínimo tamaño de agregación espacial de 3 x 3 píxeles, los coeficientes de la ecuación lineal y en particular el coeficiente de correlación espacial empiezan a estabilizarse. Sin embargo, el tamaño de agregación espacial adecuado debería ser de 5 x 5 píxeles de cada sensor.

Siempre que el tamaño de la celda de la malla (es decir, la unidad de comparación espacial) sea significativamente mayor que la escala de la heterogeneidad de la zona, se obtienen ecuaciones lineales de traslación sólidas entre sensores (es decir, con un alto coeficiente de correlación y baja dispersión). Por otro lado, si el tamaño de celda es mayor que el tamaño del cultivo homogéneo, ya no cubrirá el rango completo de NDVI (ya que las celdas con cultivos mixtos no tendrán valores extremos de NDVI, como lo son los de suelo desnudo o de una alfalfa completamente crecida). Esto va a dar lugar a ligeras variaciones en los coeficientes de la ecuación lineal (bias and gain) en diferentes áreas, con diferentes escalas de heterogeneidad y con diferente resolución del sensor. La solución adoptada va a ser la aplicación del método en zonas homogéneas y cuyos resultados mostramos más adelante.

Se supone que la dispersión de los datos mostrada en la figura IV.1 (y en otras figuras de gráficas de dispersión) se produce básicamente debido a que los diferentes sensores ven ligeramente diferentes áreas sobre la misma zona de observación, con lo que todas las superficies que caen sobre los bordes en las superficies homogéneas generan la dispersión inidcada. Las evidencias sobre esta hipótesis se basan en el hecho de que cuando se produce mayor dispersión es cuando el tamaño de agregación es menor (donde la incertidumbre en la georreferenciación tiene mayor influencia). Esto va a ser más pronunciado en áreas heterogéneas a escalas pequeñas, de tal manera que las relaciones entre sensores varían con el tipo de uso de suelo y con la composición de la superficie a esa escala (este es el caso, por ejemplo en Miura et al 2006). Este aspecto se estudió en el capítulo III con el método de zonas homogéneas (apartado III.3.2).

IV.2 Intercalibración de NDVI con otros sensores de alta- media resolución espacial.

El primer problema que surge, es que no es fácil disponer de pares de imágenes sincrónicas o casi- sincrónicas libres de nubes. En la tabla III.1, se muestran los pares de imágenes de nuestra constelación de sensores, disponibles para nuestra zona de estudio, procedentes de diversos proyectos. En todas las comparaciones realizadas, ETM+ se define como el sensor de referencia.

Las imágenes de TM se trasladan a ETM+ por medio de las relaciones entre sensores derivadas anteriormente, por lo que estos dos sensores pueden intercambiarse. Las otras comparaciones de ETM+ que se van a realizar son con LISS-III 1 D (5 Agosto 2002), dos con QuickBird (20 Mayo 2003 y 31 Julio 2003), dos con ASTER (20 Mayo 2003 y 9/10 Julio 2004) y otra con MODIS (20 Mayo 2003). También se va a comparar TM con MODIS (26 de Junio 2008).

IV.2.1 ETM+ vs. LISS- III 1D

LISS es un sensor de tamaño de píxel, estructura de banda y configuración de sensor similares a TM o ETM+. Los resultados obtenidos de la comparación son igualmente ecuaciones lineales (tabla IV.2) con coeficientes de correlación próximos a uno (en zonas homogéneas, figura IV.2, se obtienen resultados ligeramente mejor que para la zona completa). Sin embargo, los valores de la regresión en este caso son diferentes a la obtenida con TM-ETM+. La pendiente tiene una desviación mayor al 30% con respecto a la línea 1:1 en lo que se refiere a las reflectividades, pero solo del 15% para el NDVI. Por lo que otra vez se pone de manifiesto el buen comportamiento natural del NDVI.

Por el contrario, Steven et al. (2003) obtuvo resultados próximos a la línea 1:1 (tabla IV.3), como consecuencia de la similitud en la respuesta espectral de los dos sensores. Siguiendo la anterior línea de razonamiento, esta diferencia con respecto a la línea 1:1 podría indicar unos parámetros de calibración inadecuados para LISS en el caso de nuestra imagen.

Evaluación de la metodología para la comparación entre sensores

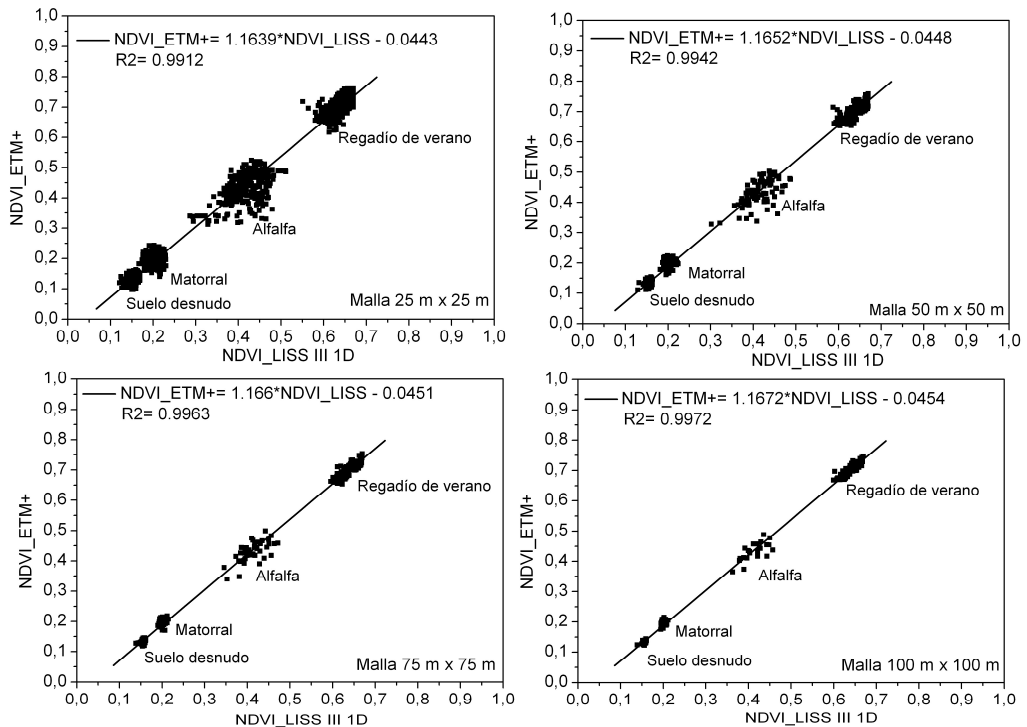


Figura IV.2 Igual que para la figura III.5 (capítulo anterior) para NDVI para Landsat 7- ETM+ (NDVI_ETM+) vs IRS LISS-III 1D (NDVI_LISS III 1D). Las parcelas homogéneas seleccionadas contienen suelo desnudo, matorral, regadío de verano y alfalfa (5 Agosto 2002).

En lo que se refiere a la dispersión de los datos cuando se aplica en zonas homogéneas (figura IV.2), es similar en todas las escalas de agregación a TM-ETM+. De nuevo, se vuelve a observar una reducción significativa de la dispersión conforme aumenta el tamaño de agregación de la celda de cada malla.

Tabla IV.2. Mismos valores que en la tabla III.2 (capítulo anterior) para las reflectividades y NDVI procedentes de LISS- III 1 D vs. ETM+, para la zona completa (sin índice) y para zonas homogéneas (índice: hom).

Variable V	Coeficientes de la ecuación lineal $V_{ETM+} = a \times V_{LISS} + b$				Coeficiente de correlación	
	a	a _{hom}	b	b _{hom}	R ²	R ² _{hom}
Reflectividad B2	1.3126	1.3053	- 0.0201	- 0.0208	0.99	0.99
Reflectividad B3	1.3390	1.3104	-0.0245	- 0.0216	0.99	1.00
Reflectividad B4	1.3783	1.4849	- 0.0537	+0.0772	0.97	0.99
Reflectividad B5	1.4400	1.3148	- 0.0907	- 0.0656	0.86	0.99
NDVI	1.1500	1.1672	- 0.0408	- 0.0454	0.96	1.00

Tabla IV.3. Coeficientes de la ecuación lineal del NDVI procedentes de ETM+ vs. LISS-III 1D y ETM+ vs. TM (con los nuevos coeficientes de calibración) sobre zonas homogéneas (tamaño de agregación 100 m x 100 m) y los obtenidos por Steven et al. (2003).

Coeficientes	5 Agosto 2002	30 y 31 Mayo 2001	Steven et al. (2003)	
	ETM+ vs. LISS-III 1D	ETM+ vs. TM	ETM+ vs. LISS-III 1D	ETM+ vs. TM
a _{hom}	1.1672	1.0336	1.009	1.021
b _{hom}	-0.0454	+0.0128	-0.002	-0.001

IV.2.2 ETM+ vs. QuickBird

QuickBird tiene similares anchos de banda y respuestas espectrales que TM y ETM+, pero muy diferente tamaño de pixel. En este caso se han obtenido relaciones lineales que ajustan a la línea 1:1 y pasan por el origen (tabla IV.4). Esto también confirma los resultados obtenidos por Steven et al. (2003). A pesar de la resolución espacial de QuickBird que es más alta, la dispersión todavía es bastante grande a la escala de 25-50 m (figura IV.3). Por tanto, también confirma las anteriores conclusiones (Martínez et al. 2003), que para sensores con diferente tamaño de píxel, el mínimo tamaño de agregación, para obtener una aceptable inter- calibración, se determina por el sensor de menor resolución (en este caso, ETM+).

Tabla IV.4. Mismos valores que en la tabla IV.3 para ETM+ vs. QuickBird en dos fechas diferentes. Los datos de TM del 31 de Julio de 2003 son trasladados a ETM+ por medio de la ecuación $NDVI_{ETM+} = 1.0336 * NDVI_{TM} + 0.0128$ (Tabla IV.7). Δ = desviación del valor medio.

Coeficientes de la ecuación lineal $NDVI_{ETM+} = a_{hom} * NDVI_{QuickBird} + b_{hom}$	20 Mayo 2003		31 Julio 2003		Valor medio de las dos fechas $\pm \Delta$	Steven et al (2003)
	a_{hom}	1.0526	1.036	1.044		
b_{hom}	+0.0146	+0.0236	0.019	± 0.005	+0.003	

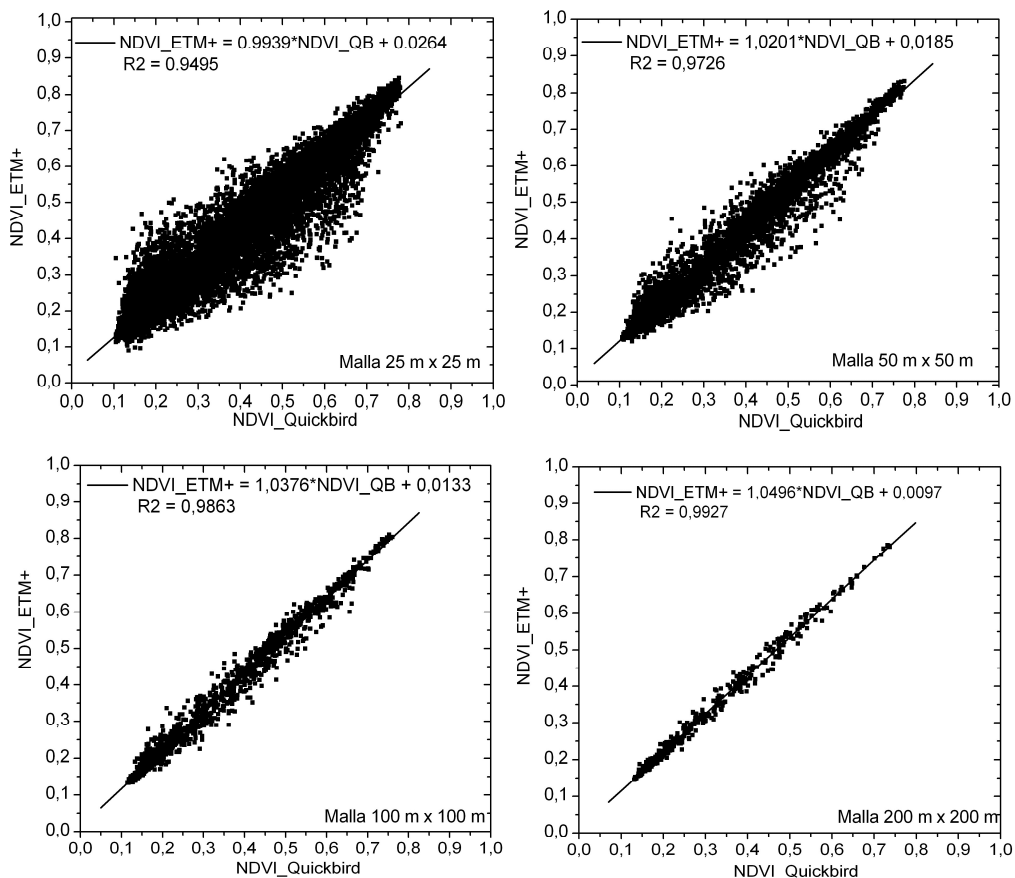


Figura IV.3. NDVI de Landsat 7- ETM+ ($NDVI_{ETM+}$) vs. QuickBird ($NDVI_{Quickbird}$), para cuatro diferentes tamaños de malla (20 Mayo 2003).

Algunas críticas han sido encaminadas acerca del alto valor obtenido del coeficiente R^2 , argumentado un posible efecto de autocorrelación espacial debido al procedimiento utilizado, ya que este método podría tender a inflar el valor de R^2 cuando se usan todos los píxeles de la imagen. Para comprobar esta línea de razonamiento, se va a adoptar otro método para poder compararlos. Para ello, se extrae una muestra a lo largo de una malla regular, y solamente los píxeles pertenecientes a dicha muestra fueron utilizados para la regresión lineal con el fin de disminuir los efectos anteriormente mencionados.

Utilizando este procedimiento alternativo, los resultados obtenidos a diferentes escalas de agregación entre las imágenes sincrónicas del 20 de Mayo de 2003, de Landsat 7- ETM+ y QuickBird, mostraron unos valores de R^2 muy similares a los nuestros (Ver en la figura IV.4, donde se obtiene un valor de 0,97 para el tamaño de celda de 200 m x 200 m, comparar con la figura IV.3)

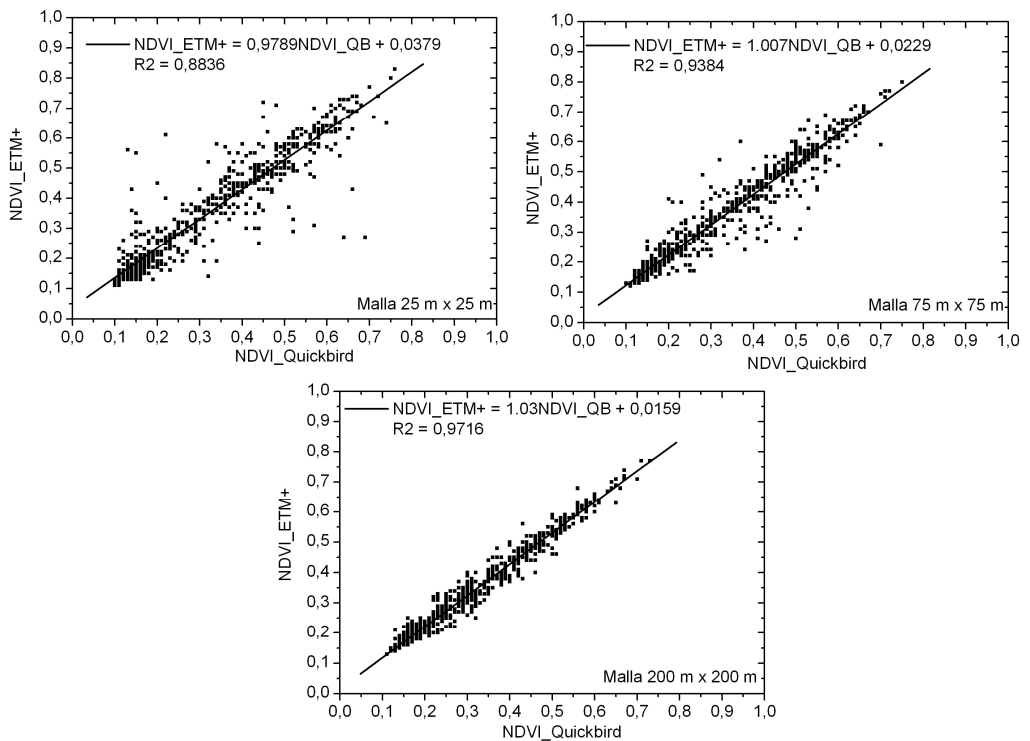


Figura IV.4. NDVI de Landsat 7- ETM+ vs. QuickBird para tres diferentes tamaños de malla NDVI de Landsat (20 Mayo 2003), utilizando un procedimiento alternativo para la comparación de las imágenes.

El conjunto de los dos pares de imágenes sincrónicas de QuickBird y Landsat5-TM sirve como un test adicional del *Método de zonas homogéneas* descrito en el capítulo III (Figura IV.5). Únicamente se obtiene una ligera variabilidad de los coeficientes en la relación lineal cuando se comparan separadamente cada par de imágenes por un lado, y cuando se hace para las cuatro imágenes por otro (resultados no mostrados). Este test más adelante va a confirmar la fiabilidad de nuestro procedimiento de comparación.

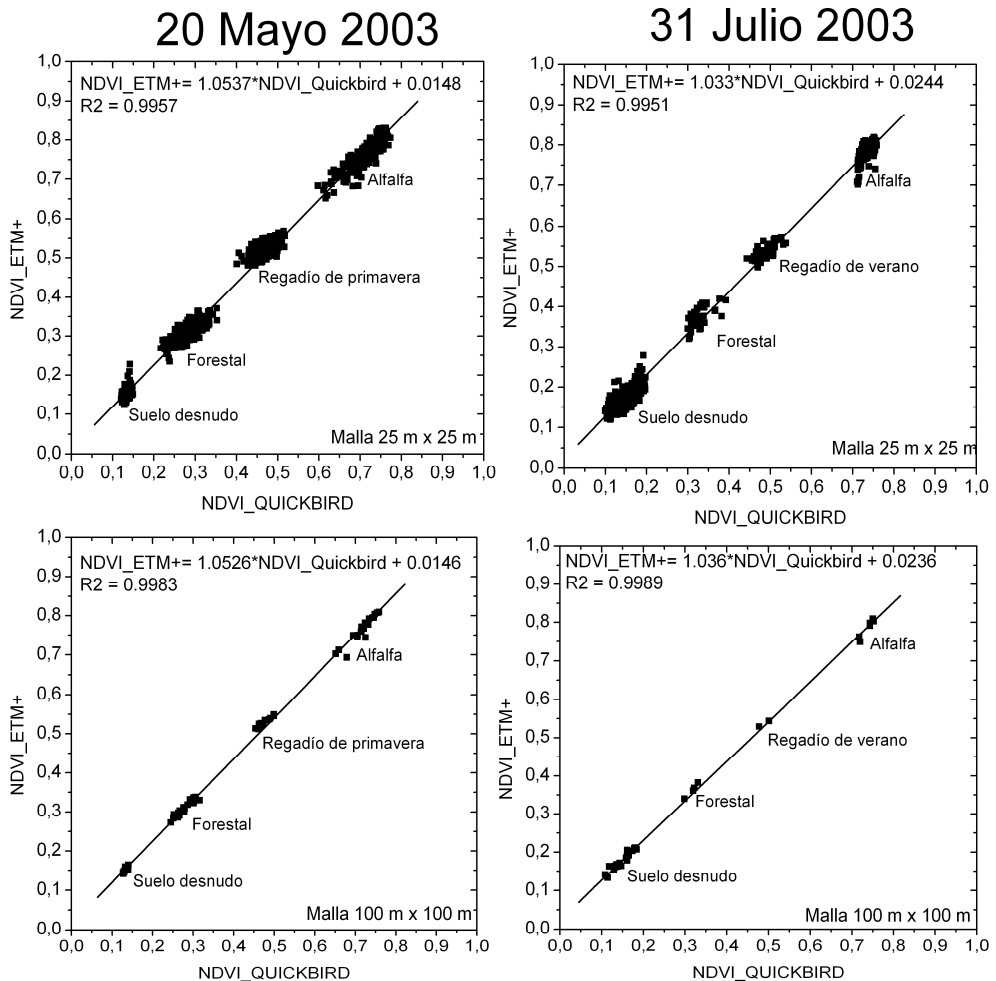


Figura IV.5. NDVI de ETM+ vs. QuickBird (20 Mayo 2003, gráficas de la izquierda), ETM+ vs QuickBird (31 Julio 2003, gráficas de la derecha, los datos de TM se trasladan a ETM+ por medio de la ecuación $NDVI_{ETM+} = 1.0336 * NDVI_{TM} + 0.0128$) en zonas homogéneas con una malla de tamaño de 25 m (gráficas superiores) y 100 m (gráficas inferiores). Las parcelas homogéneas contienen suelo desnudo, forestal, regadío de primavera y alfalfa.

IV.2.3. ETM+ vs. ASTER

ASTER tiene un tamaño de pixel similar a los sensores Landsat, pero ligeramente diferente estructura de banda y configuración del sensor. En este caso se vuelven a encontrar relaciones lineales (tabla IV.5, figura IV.6), aunque también se observa cierto grado de desviación de la línea de regresión 1:1 (por encima del 16% para el nivel L1B, ver más adelante). Esto puede ser debido a las diferencias en las características radiométricas del sensor (H. Watanabe, comunicación personal).

Tabla IV.5. Mismos datos que en la tabla IV.4 para NDVI procedente de Aster vs. ETM+ (datos no disponibles de Steven et al. 2003).

<i>Coefficientes of ecuación lineal</i> $NDVI_{ETM+} = a * NDVI_{ASTER} + b$	20 Mayo 2003	9/10 Julio 2004	Valor medio de las dos fechas $\pm \Delta$
a_{hom}	1.1526	1.1081	1.1304 \pm 0.022
b_{hom}	-0.0192	+0.0185	-0.0002 \pm 0.019

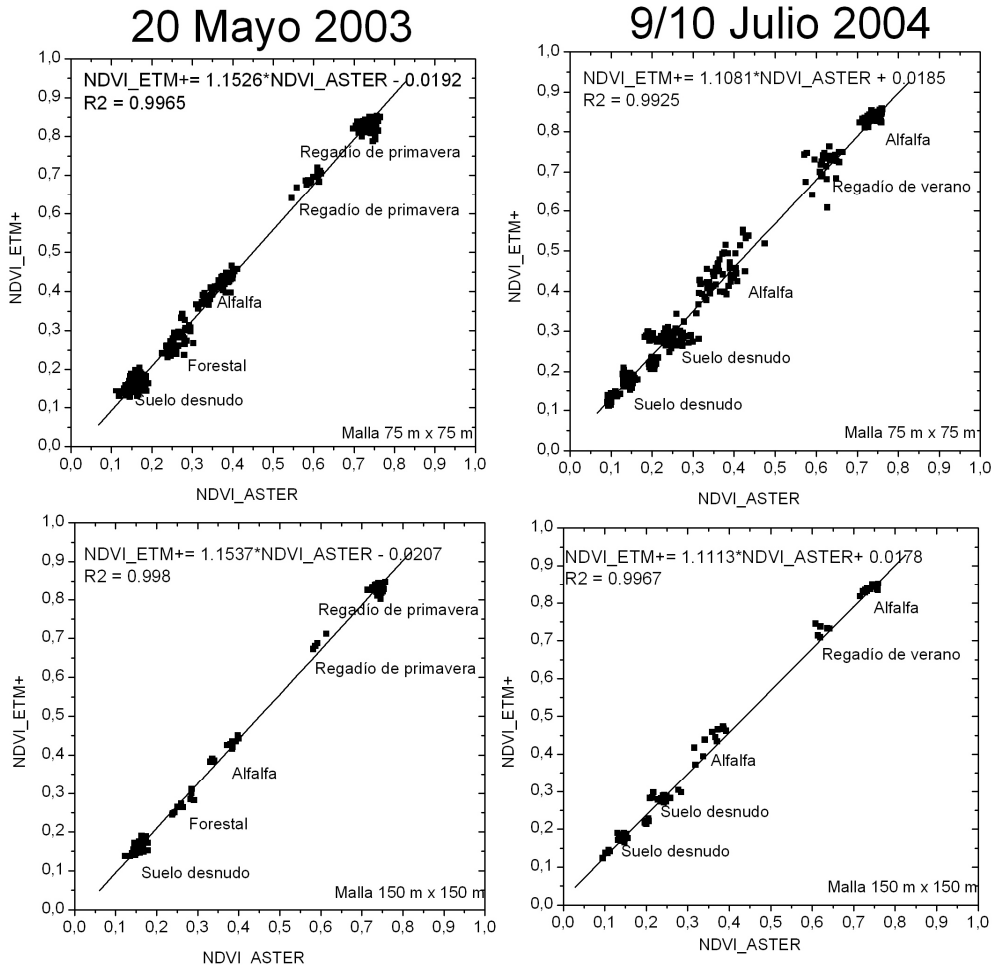


Figura IV.6. Igual que la figura IV.5 para el NDVI de ETM+ vs. ASTER (20 Mayo 2003) y ETM+ vs. ASTER (9/10 Julio 2004) para tamaño de malla de 75m y 150m.

Esta figura IV.6 (para ASTER), como la anterior figura IV.5 (para QuickBird), confirman de nuevo que las relaciones entre el NDVI muestran valores de correlación más altos cuando seleccionamos zonas homogéneas pertenecientes a un único cultivo, así como la dispersión de los datos fue significativamente reducida. En todos los casos, se obtiene un coeficiente de correlación próximo a la unidad y los coeficientes de la ecuación lineal permanecen constantes para todos los tamaños de malla, comenzando por el

primero de ellos de 25 m x 25 m. Esto vuelve a confirmar nuestras anteriores conclusiones de que la incertidumbre en la georreferenciación es el factor fundamental en la dispersión de los datos entre observaciones procedentes de todos nuestros sensores.

IV.3. Estabilidad temporal de las relaciones lineales obtenidas

Ya que el principal interés de este trabajo está en la obtención de series temporales de mapas de NDVI procedentes de nuestra constelación, la cuestión de la estabilidad temporal de las ecuaciones de traslación entre sensores es de primordial importancia. Sin embargo, los datos adecuados de pares de imágenes casi- sincrónicas y en varias fechas son bastante difíciles de conseguir. Se dispone de dos pares de imágenes en las que intervienen QuickBird y ASTER que ya se discutió en el anterior apartado. Con el fin de extender los datos disponibles, se ha añadido una serie de comparaciones Landsat-NOAA-AVHRR.

Las ecuaciones lineales para trasladar los datos de QuickBird a Landsat son bastante similares en las dos fechas (tabla IV.4). Estas dos fechas pertenecen a diferentes fases del crecimiento de la vegetación, de hecho abarcan un amplio rango de condiciones atmosféricas y de vegetación. Además, se produce un buen acuerdo con los resultados basados en simulación realizados por Steven et al. (2003). Por lo que podemos concluir con confianza que estas relaciones son lineales en el tiempo.

Sin embargo esta situación es ligeramente diferente para ASTER; donde si que encontramos diferencias en los coeficientes de la ecuación lineal entre las dos fechas, dependiendo de si se usa el nivel L1A o L1B de los productos ASTER. Las dos fechas cubren un rango similar de condiciones a las imágenes de QuickBird. La intercalibración de ASTER L1B con ETM+ (tabla IV.5) da resultados más similares entre ambas fechas.

En la figura IV.7 se muestra la diferencia relativa de NDVI entre las dos fechas. Para QuickBird esta diferencia es siempre menor del 2% (excepto para los valores más bajos de NDVI en todo el rango de la vegetación). Para ASTER L1A esta diferencia es mayor que para ASTER L1B sobre todos para valores bajos de NDVI, posiblemente debido a un ligero fallo en ASTER (VNIR y TIR) en lo que se refiere a la sensibilidad del detector durante varios años, como fue indicado por H. Watanabe (comunicación personal).

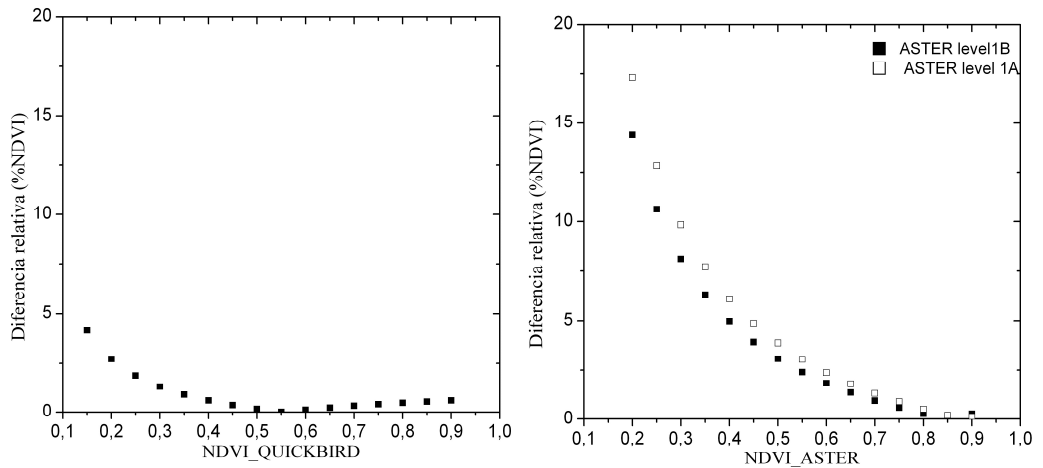


Figura IV.7. Cambios de NDVI en imágenes de dos fechas diferentes, como se expresa con el tanto por ciento de la diferencia relativa (% Δ NDVI): en la gráfica de la izquierda se muestra para Landsat ETM+ vs. QuickBird, y en la gráfica de la derecha para TM vs. ASTER (■ L1B, □ L1A).

Consecuentemente, todos los productos de ASTER afectados durante un periodo de tiempo inmediatamente anterior a nuestras imágenes (hasta 14 Mayo de 2003) fueron reprocesados por el ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*). Por lo que los resultados obtenidos pueden ser un indicador de que puede ser necesario una posterior recalibración y reprocesamiento, al menos, algunos meses más. Esto ha sido confirmado por el hecho de que los productos de nivel L1B han sido efectivamente recalibrados para responder al fallo existente. Las ecuaciones de traslación entre sensores resultantes (basadas en los productos del nuevo nivel L1B, tabla IV.5) son ahora más estables con el tiempo (figura IV.6). Por tanto, obviamente los productos de nivel L1B son los necesarios para la intercalibración.

IV.3.1. Caso ETM+ vs. AVHRR

La comparación de NDVI procedente de NOAA-AVHRR vs. Landsat 7-ETM+, es diferente debido al gran tamaño de pixel de AVHRR. En este caso el tamaño de las celdas de los diferentes grids seleccionados han sido: 1km \times 1km, 2km \times 2km, 3km \times 3km, 5km \times 5km, y 7km \times 7km, que coincide con un número entero de píxeles AVHRR, esto es 1, 4, 9, 25, y 49 y con un número de píxeles TM, 1,600, 6,400, 14,400, 40,000, y 78,400 respectivamente. Hay cuatro

pares de imágenes casi- sincrónicas disponibles para la comparación, dos con ETM+ (30 Mayo y 17 Julio 2001) y dos con TM (30 Mayo y 19 Agosto 2001). Esta serie temporal cubre una parte importante del ciclo de crecimiento de la vegetación durante el mismo año. Por lo tanto es muy favorable para la investigación de la estabilidad temporal de las ecuaciones de traslación entre sensores.

En la tabla IV.6 se muestra la secuencia completa de los coeficientes de la ecuación de traslación lineal. Dichos coeficientes se han obtenido, o directamente de la comparación con ETM+, o por medio de un procedimiento de dos pasos, en el que intervienen, la traslación de TM a ETM+ y la comparación de AVHRR con TM. Esta serie temporal de coeficientes muestran ecuaciones lineales muy estables en el tiempo y una desviación estándar de la media menor del 2%. Estos coeficientes también están en buen acuerdo con los resultados obtenidos por Steven et al. (2003) (columna derecha de la tabla IV.6).

Tabla IV.6. Mismos valores que en la tabla IV.4 del NDVI procedente de Landsat 7- ETM+ y Landsat 5 TM (con los nuevos coeficientes de calibrado) vs. NOAA 16-AVHRR para cuatro diferentes fechas (tamaño de agregación: 5 km x 5 km; no se dispone de zonas homogéneas). σ = desviación estándar del valor medio.

<i>Coeficientes de la ecuación lineal NDVI_ETM+= a*NDVIVHRR+ b</i>	<i>30 Mayo 2001</i>	<i>31 Mayo 2001</i>	<i>17 Julio 2001</i>	<i>19 Agosto 2001</i>	<i>Valor medio $\pm \sigma$</i>	<i>Steven et al (2003)</i>
a	1.127	1.171	1.136	1.118	1.138 \pm 0.020	1.129
b	+0.023	+0.017	+0.011	+0.052	+0.026 \pm 0.016	-0.008
<i>Coeficientes de la ecuación lineal NDVI_TM= a*NDVI AVHRR+ b</i>						
a	----	1.029	----	0.983	1.006 \pm 0.023	1.106
b	----	+0.114	----	+0.145	+0.130 \pm 0.015	-0.007

Las dos última filas en la tabla IV.6 muestran los coeficientes que se obtuvieron de la comparación TM-AVHRR, usando los anteriores coeficientes de calibración para TM (en Martínez et al., 2003). En este caso, el acuerdo con los resultados obtenidos por Steven et al (2003) es peor. Lo que proporciona otro ejemplo que confirma la necesidad de aplicar los nuevos coeficientes de calibrado (Chandler and Markham, 2003) para nuestras imágenes anteriores.

Esto no solo va a dar clara evidencia de que la correlación y la estabilidad temporal son significativamente mejoradas cuando usamos los nuevos coeficientes de calibrado para TM, sino que también indica que el uso de coeficientes de calibrado erróneos puede ocultar la señal real en una serie temporal.

Debido al gran tamaño de píxel de AVHRR, no se puede aplicar en este caso el método de zonas homogéneas, ya que requeriría encontrar en la misma imagen, al menos tres zonas extensas cubiertas homogéneamente por diferentes cultivos representativos sobre el rango completo de NDVI. Consecuentemente, las ecuaciones de traslación entre sensores tienen que ser derivadas de la comparación en toda la imagen completa (zona heterogénea). Una mayor muestra de pares de imágenes ayudará a incrementar la importancia estadística de la ecuación resultante. En este caso particular, la desviación estándar de la media es muy baja y por tanto es una buena medida de la estabilidad de la ecuación de traslación.

IV.4. Resumen de las ecuaciones lineales para aplicaciones operacionales

De acuerdo con el objetivo práctico de este trabajo, se va resumir en este apartado las ecuaciones de traslación entre sensores derivadas de los apartados previos. Las ecuaciones lineales son obtenidas para la conversión de TM, LISS, ASTER, y QuickBird a ETM+ a partir del método de zonas homogéneas. Se encontró que se mantenía un comportamiento estable en el tiempo para QuickBird y ASTER L1B (pero mucho menos para L1A). El uso de los productos L1B es absolutamente imprescindible para la intercalibración con ASTER. En ambos casos, se usa la media aritmética de las dos fechas con la medida de incertidumbre indicada. En este caso, sería conveniente repetir la cross-calibración al menos una vez al año, con el fin de detectar errores en la calibración del sensor. Sin embargo, se advierte acerca del uso generalizado de estas ecuaciones ya que han sido obtenidas bajo ciertas condiciones climáticas, orográficas y de vegetación y para una selección específica de imágenes. Además

otra de las limitaciones es que dichas ecuaciones se aplican a reflectividades y NDVI en el techo de la atmósfera, como fue comentado al principio del capítulo. En posteriores trabajos, sería necesario contrastar esta serie de ecuaciones, bajo diferentes condiciones y con otros sensores, especialmente MODIS.

En el caso de de AVHRR a ETM+, se ha derivado la ecuación de traslación recomendada a partir de la media de la intercalibración realizada para los cuatro pares de imágenes (los cuales muestran diferencias muy pequeñas entre ellas). Aunque las diferencias en la mayoría de los casos son pequeñas, se mantienen diferentes ecuaciones para los diferentes tamaños de agregación. En la tabla IV.7 se dan los coeficientes de las ecuaciones resultantes para el caso de tamaño de celda de 100 m de longitud (75 m en el caso de ASTER y 5 km para AVHRR), el cual es el mínimo tamaño de malla recomendado.

Tabla IV.7. Resumen de las ecuaciones de traslación entre sensores para los elementos pertenecientes a nuestra constelación de sensores.

<i>Sensor X</i>	<i>Coefficientes de la ecuación lineal NDVI_ETM+= a*NDVI_sensor X + b</i>	
	a	b
TM	1.0336	+0.0128
LISS III 1D	1.1672	-0.0454
QuickBird*	1.0443±0.008	+0.0191±0.005
Aster*	1.1304±0.022	-0.0002±0.019
AVHRR**	1.1381±0.020	+0.0260±0.016

* Promedio de dos fechas ± Δ; Δ = desviación del valor medio.

**Promedio de cuatro fechas ± σ; σ = desviación estándar del valor medio.

IV.5. Comparativa del método propuesto de normalización frente a métodos de corrección atmosférica absoluta.

El procedimiento de comparación entre imágenes anteriormente descrito va a permitir analizar los diferentes procesos de corrección atmosférica utilizados en este trabajo y su comparación con el método de normalización absoluta descrito en el capítulo II.

Para ello se dispone de imágenes Landsat 5- TM y Landsat 7- ETM+ corregidas por el procedimiento de Guanter, imágenes FORMOSAT- 2 corregidas por CESBIO e imágenes MODIS corregidas por LP DAAC. De esta forma se aborda el análisis con diferentes tamaños de resolución espacial.

El primer paso ha sido analizar qué efectos producen los diferentes métodos de corrección atmosférica sobre los valores TOA iniciales. Se han comparado imágenes TOA, tanto reflectividades como NDVI frente a esas mismas imágenes corregidas atmosféricamente. En la figura IV. 8 se muestra un ejemplo para los sensores FORMOSAT- 2 y Landsat 5- TM y en la tabla IV.8 se resume todos los resultados obtenidos para el resto de las comparaciones de las reflectividades BOA vs. TOA (Calera et al, 2010).

Los resultados muestran que el efecto de la corrección atmosférica tanto para las reflectividades banda a banda como para el NDVI, puede ser descrito por una transformación lineal, al menos para los procedimientos descritos y para el ámbito espacial estudiado. Los coeficientes de la ecuación lineal obtenidos son dependientes de las fechas analizadas. Los resultados muestran que el efecto de la corrección atmosférica puede ser descrito por una transformación lineal.

En segundo lugar se ha procedido a comparar el NDVI_BOA de las corregidas atmosféricamente con el NDVI _BOA de las imágenes normalizadas, que es el objetivo principal de este epígrafe.

Como se describió en el cap. II, la atmósfera distorsiona tanto la radiación incidente como la reflejada que alcanza el sensor en múltiples vías. Pero las distorsiones no solo dependen de la propia atmósfera, sino también de la iluminación y características de la superficie sobre la que incide la radiación solar. Es por ello que para realizar esta comparación se han seleccionado cuidadosamente dos zonas bien diferenciadas, tanto en lo que se refiere a la

vegetación presente en ellas como a las características orográficas de las superficies.

Por un lado se ha elegido una zona orográficamente llana, típica de la meseta Sur de la península, la Mancha, situada a 700 m de altura sobre el nivel del mar, con vegetación predominantemente debida cultivos agrícolas, con cubiertas que van desde suelo desnudo hasta vegetación densa, con una fracción importante de cultivos de regadío, a la que hemos denominado zona 1, ver figura IV. 9

La segunda zona seleccionada, zona 2, que también se muestra en la figura IV.9, corresponde a gran parte de la denominada Sierra de Alcaraz, y en ella predomina la vegetación natural, con importantes zonas boscosas, presentando importante relieve y por tanto una orografía mucho más compleja que en el caso anterior.

Cada una de estas zonas cubre una superficie de 1225 km², siendo la coordenada superior izquierda de la zona 1 (568546, 4337107) y la coordenada superior izquierda de la zona 2 (541522, 4302176). En la figura IV.9 en la que se muestran las zonas 1 y 2 se ha superpuesto la malla de tamaño de lado de 1000 m, sobre una composición color RGB543 de Landsat5-TM adquirida el 20 de Mayo de 2003. Dicha malla va a ser utilizada para establecer el análisis de los valores en este tamaño de malla que ven los diferentes sensores e imágenes.

Evaluación de la metodología para la comparación entre sensores

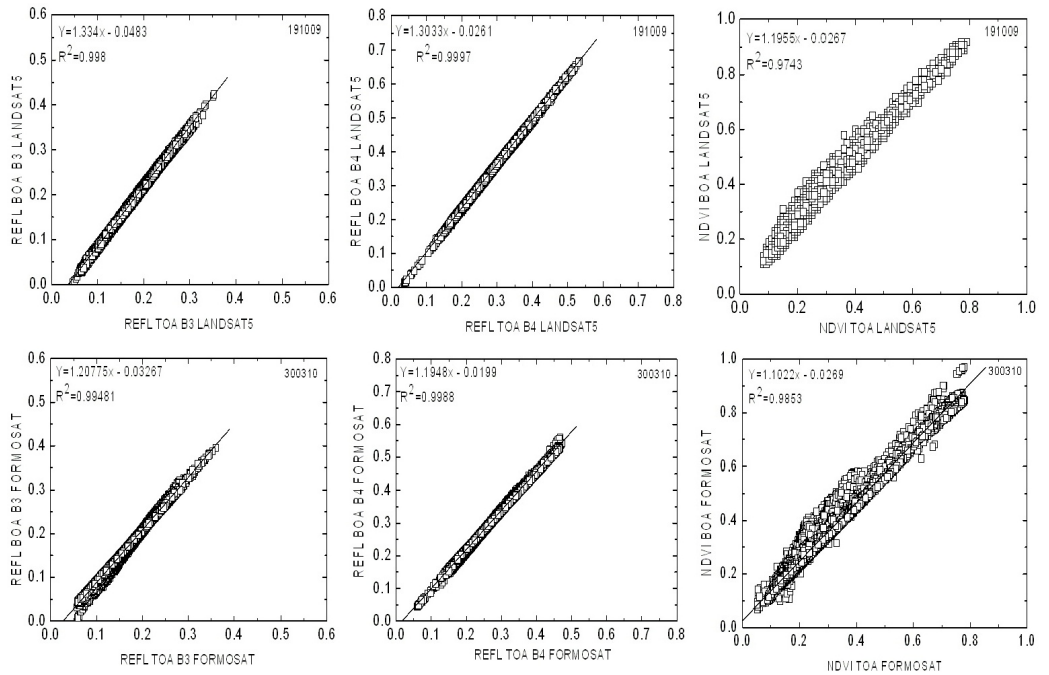


Figura IV.8. Relaciones BOA_TOA obtenidas para Landsat 5 y FORMOSAT: (a) Reflectividad en el rojo; (b) Reflectividad en el infrarrojo(c) Índice NDVI.

Tabla IV.8. Comparación de las reflectividades (ROJO E INFRARROJO) BOA vs. TOA para FORMOSAT, Landsat 5 y Landsat 7

Fecha	Sensor	REFL. ROJO BOA vs TOA			REFL. INFRARROJO BOA vs. TOA		
		a	b	R ²	a	b	R ²
03/10/2009	FORMOSAT	-0.03	1.21	1.00	-0.02	1.20	1.00
03/10/2009	Landsat 5	-0.03	1.55	1.00	-0.01	1.58	1.00
19/10/2009	FORMOSAT	-0.03	1.20	1.00	-0.02	1.20	1.00
19/10/2009	Landsat 5	-0.05	1.33	1.00	-0.03	1.30	1.00
11/02/2010	FORMOSAT	-0.03	1.18	1.00	-0.01	1.18	1.00
30/03/2010	FORMOSAT	-0.03	1.21	1.00	-0.02	1.19	1.00
16-17/05/2010	Landsat 7	-0.03	1.19	1.00	-0.01	1.17	1.00

ZONA DE ESTUDIO

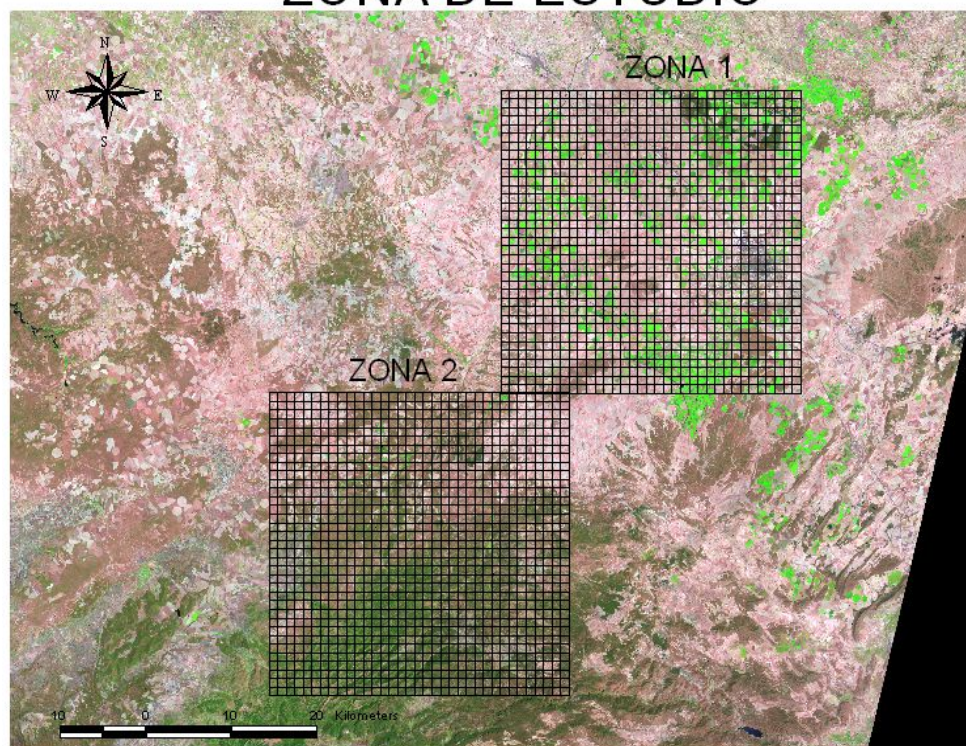


Figura IV.9. Composición color RGB 543 del 20 de Mayo de 2003 de Landsat 5-TM, sobre la cual se muestran las mallas de 1000m de las zonas 1 y 2 utilizadas en los cruces.

La selección de las zonas permite que una misma escena Landsat, y por supuesto, una misma escena MODIS abarquen ambas áreas, lo que va a permitir la comparación para un mismo sensor y entre ellos.

Se va aplicar la metodología de comparación descrita en el capítulo III a las imágenes corregidas atmosféricamente frente a las mismas imágenes normalizadas de acuerdo con el procedimiento descrito en la Sección II.5.4.

4.5.1.- Comparación de procedimientos de corrección y normalización atmosféricas en la Zona 1.

En este apartado se procede a la comparación de imágenes normalizadas frente a las mismas corregidas atmosféricamente. Para ello, se aplica el método de normalización a una serie de imágenes Landsat-5 TM, tal y como se describió en el capítulo II. La metodología propuesta se denomina normalización puesto que las imágenes se reescalan respecto a valores de índices de vegetación conocidos, y absoluta porque los valores patrón de NDVI han sido obtenidos a partir de medidas en tierra, eliminando el efecto de la atmósfera. Este método se basa en que es posible encontrar superficies en cada imagen cuyo NDVI presenta un valor similar (invariante) y que dichas superficies deben abarcar el rango completo de valores de NDVI. El NDVI invariante de estas superficies debe ser conocido.

Las mejores superficies NDVI-invariantes son el suelo desnudo y la vegetación verde muy densa, que representan los dos extremos del rango dinámico de valores de NDVI para la superficie terrestre. Los índices de vegetación de estas superficies han sido medidos con radiometría de campo y contrastados para distintas áreas, obteniendo en todo caso valores muy similares y constantes en el tiempo. Los valores conocidos se toman como patrón y en base a ellos se procede a la normalización de las imágenes estudiadas.

En lo que se refiere a la corrección atmosférica de las imágenes, se utiliza una adaptación del modelo de corrección atmosférica absoluta desarrollado por la Universidad de Valencia (Guanter et al., 2007) como método de comparación y evaluación. La modificación de esta metodología y su adaptación a sensores multiespectrales, Landsat-5 TM, ha sido desarrollada por el mismo autor dentro del proyecto DEMETER.

La idoneidad de la metodología propuesta se evalúa comparando la imagen normalizada frente a la misma imagen con corrección atmosférica absoluta. La

comparación de imágenes TM se realiza píxel a píxel para un total de 65000 píxeles seleccionados (muestreo aleatorio) sobre al área de estudio, eliminando aquellos píxeles afectados por nubes o sombras (Campos et al, 2011). Las imágenes analizadas en la zona 1 se muestran en la Tabla IV.9, así como las ecuaciones de normalización del índice NDVI para las imágenes de Landsat 5 - TM. Los valores de la pendiente y la ordenada en el origen son similares en todas las fechas estudiadas puesto que el $NDVI_TM_{TOA}$ muestra cierta estabilidad en todo el periodo. Dichas ecuaciones se han aplicado obteniendo imágenes de $NDVI_TM_{normalizado}$ para toda la zona de estudio y para las fechas estudiadas. .

Tabla IV.9. Listado de fechas de las imágenes estudiadas para el sensor Landsat 5- TM. Ecuaciones de normalización obtenidas para las imágenes de Landsat 5- TM estudiadas, $NDVI_TM_{normalizado} = m \cdot NDVI_TM_{TOA} + b$.

<i>Fechas</i>	<i>m</i>	<i>b</i>
24/05/2010	1,0833	0,0108
31/05/2010	1,1143	-0,0149
16/06/2010	1,0986	0,0092
02/07/2010	1,1143	-0,0037
11/07/2010	1,0833	0,0217
18/07/2010	1,1014	0,0068

La comparación de los valores de $NDVI_TM_{normalizado}$ respecto a los valores de NDVI derivados del método de corrección atmosférica absoluta ($NDVI_TM_{BOA}$) obtenidos a partir de imágenes TM, Fig. IV.10, muestra un buen acuerdo para todo el rango de valores. La escala de comparación se ha efectuado a la del tamaño 3x3 pixel de cada una de las imágenes.

La pendiente de las rectas de regresión obtenidas presentan valores muy cercanos a 1 y la ordenada es inferior a 0.02 en todos los casos tal y como se muestra en la Tabla IV.10.

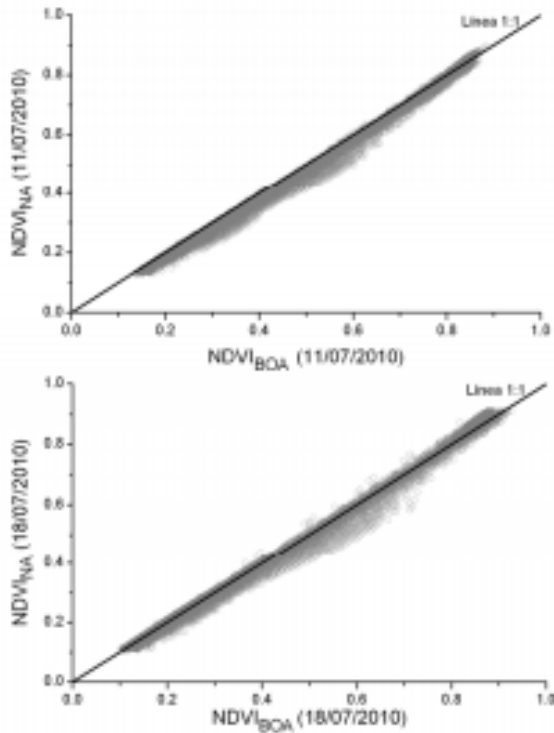


Figura IV.10. Correlación de los valores de NDVI obtenidos mediante el método de normalización absoluta propuesto y el método de corrección atmosférica absoluta utilizado como referencia.

Tabla IV.10. Pendiente, ordenada en el origen y RMSE de la comparación de NDVI normalizado frente a NDVI_BOA

<i>Fecha</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Ordenada</i>	<i>RMSE</i>
24/05/2010	0,985	-0,007	0,025
31/05/2010	0,980	0,020	0,022
16/06/2010	0,985	-0,013	0,024
02/07/2010	0,975	-0,011	0,027
11/07/2010	0,980	.0,014	0,023
18/07/2010	0,984	-0,013	0,017

El acuerdo entre las series de datos, cuantificado mediante el error cuadrático medio (RMSE), Tabla IV.10, indica que el método de normalización puede considerarse equivalente al método de corrección atmosférica absoluta, al menos para la serie de imágenes y zona aquí considerada. El método de normalización absoluta presentado se muestra como un método de corrección válido que además permite la comparación de imágenes de múltiples sensores. Su aplicación requiere del conocimiento del área de estudio, dinámica de las cubiertas vegetales presentes y respuesta radiométrica de las mismas.

4.5.2.- Comparación de procedimientos en la Zona 2

La Zona 2 se caracteriza por una mayor complejidad tanto en lo que se refiere al relieve como a la estructura de vegetación, siendo ésta la correspondiente a la vegetación natural en la que abundan pinos, encinas y matorral, entre los que se intercalan zonas de cultivo. En este caso la orografía y la vegetación introducen fuertes cambios en la iluminación y sombras, efectos no contemplados suficientemente en el caso correspondiente a la zona 1.

El proceso de normalización aplicado a toda la imagen requiere de la hipótesis de una misma atmósfera para toda ella, y se traduce en una transformación lineal del índice de vegetación calculado en el techo de la atmósfera.

Sin embargo, al analizar cómo operan las correcciones atmosféricas en las zonas 1 y 2, se han encontrado diferencias en las relaciones entre valores BOA-TOA para ambas zonas para imágenes Landsat (corregidas según el procedimiento de Guanter) y MODIS (descargadas de la página web), lo que podría indicar que los algoritmos aplicados son sensibles a los diferentes paisajes representados en las zonas, aunque la atmósfera sea la misma.

En el caso de la corrección para Landsat indicada por Guanter, cada una de las zonas parece presentar relaciones lineales dominantes con pendiente y ordenadas distintas, lo que en algunos casos se pone claramente de manifiesto como se puede observar en la figura IV-11.

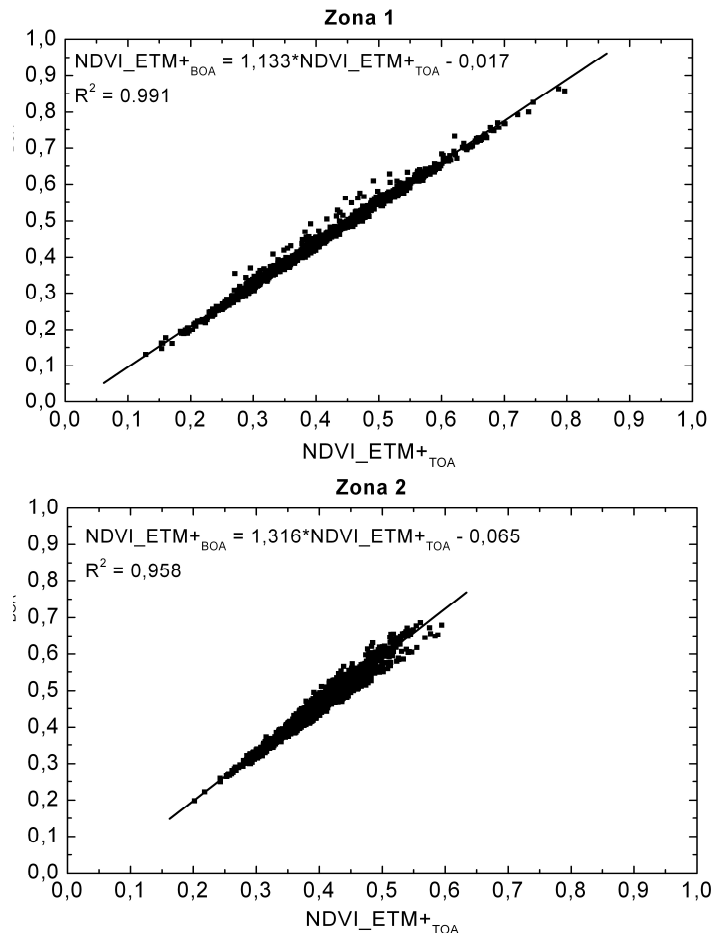


Figura IV.11. Efecto de la corrección atmosférica en el caso del sensor ETM+ para el 20 de Mayo de 2003, para cada una de las zonas consideradas.

De la misma manera se ha efectuado la comparación entre valores NDVI_BOA y NDVI_TOA para MODIS (Figura IV.13) y para otras fechas de imágenes Landsat 5- TM (Figura IV.12). En ella se aprecian diferencias notables en el efecto de la corrección atmosférica dependiendo de la zona considerada.

Si consideramos en un único conjunto ambas zonas, figura IV.14, encontramos que la dispersión lineal se incrementa, apreciándose para el caso de Landsat sobretodo, la existencia de dos relaciones aparentemente diferentes dependiendo de la zona.

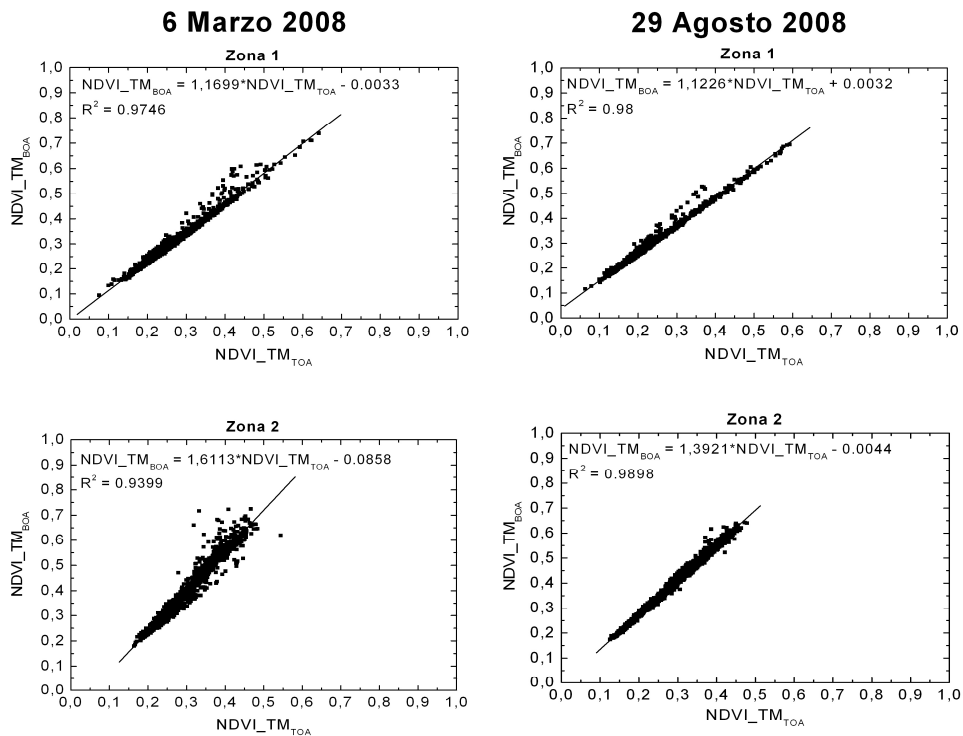


Figura IV.12. Efecto de la corrección atmosférica sobre el NDVI, $NDVI_{TM_{BOA}}$, respecto al valor en el techo de la atmósfera $NDVI_{TM_{TOA}}$, para imágenes del sensor TM adquiridas el 6 de Marzo y el 29 de Agosto de 2008, considerando dos zonas con orografía y vegetación diferentes.

6 Marzo 2008

29 Agosto 2008

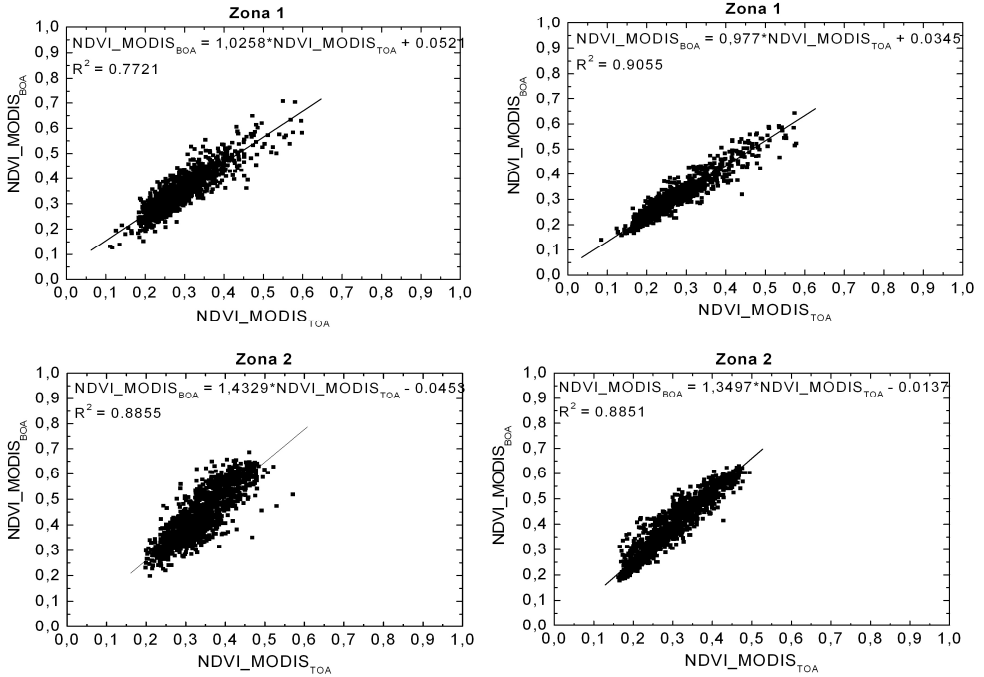


Figura IV.13. Efecto de la corrección atmosférica sobre el NDVI, $NDVI_MODIS_{BOA}$, respecto al valor en el techo de la atmósfera $NDVI_MODIS_{TOA}$, para imágenes del sensor MODIS adquiridas el 6 de Marzo y el 29 de Agosto de 2008, considerando dos zonas con orografía y vegetación diferentes.

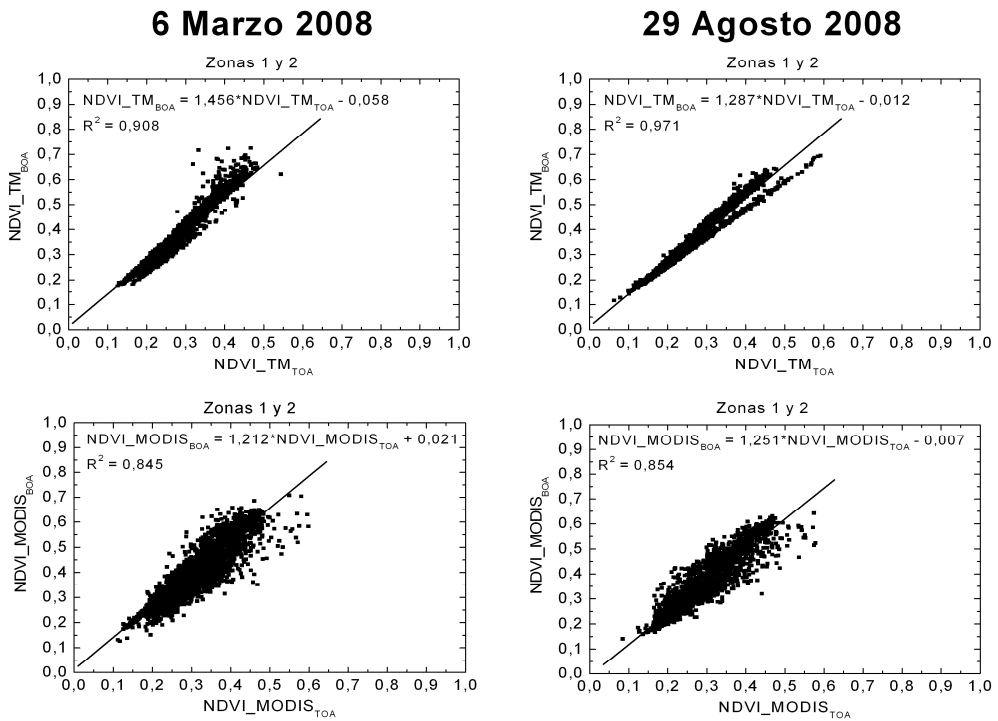


Figura IV.14. Efecto de la corrección atmosférica sobre el NDVI, respecto al valor en el techo de la atmósfera, para imágenes de los sensores TM y MODIS adquiridas el 6 de Marzo y el 29 de Agosto de 2008, pero uniendo en este caso las zonas 1 y 2.

La figura IV.15 muestra la comparación entre valores de NDVI normalizados y valores de NDVI corregidos atmosféricamente para la imagen del sensor ETM+ del 20 de Mayo de 2003. Como se puede observar, en comparación con este proceso de corrección, y para la zona 2, la normalización en general infraestima el NDVI en relación al calculado según Guanter, mientras que, como se ha mencionado anteriormente, ajusta muy bien para el caso de la zona 1.

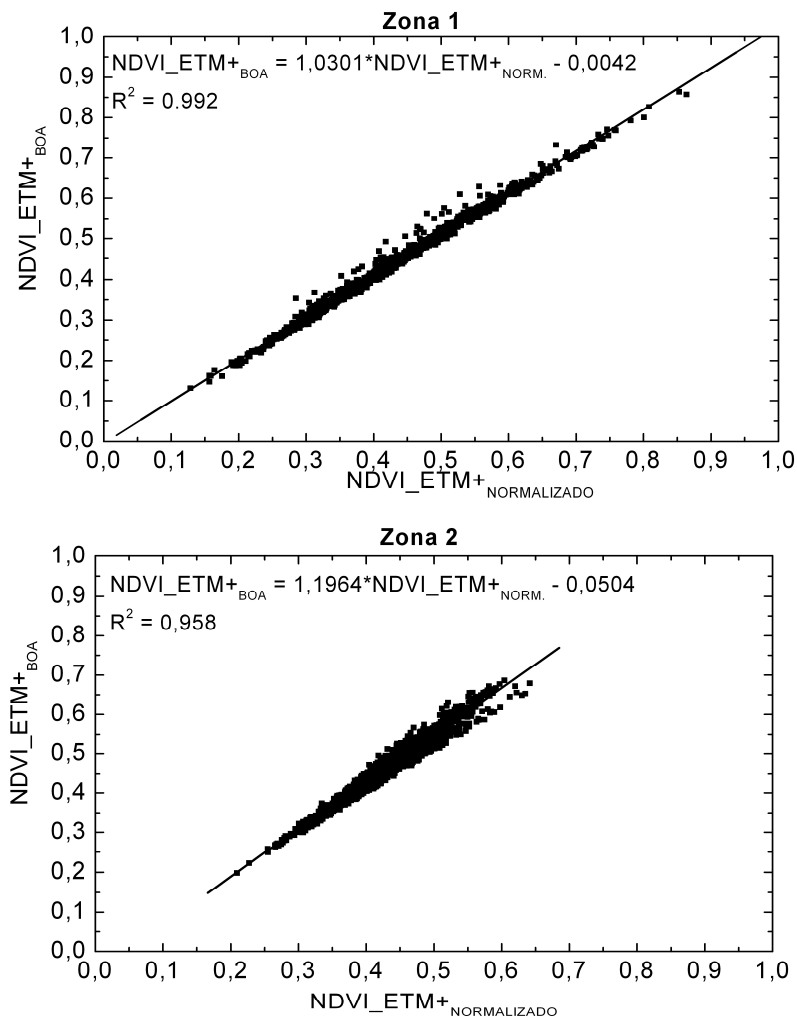


Figura IV.15. Comparación del NDVI_ETM+_BOA con el NDVI_ETM+_NORMALIZADO (20 Mayo 2003), en ambas zonas.

Para el caso de las correcciones aplicadas en MODIS, se aprecia también que la normalización en la zona 2 parece infraestimar, aunque en este caso más ligeramente, el NDVI cuando se compara con el calculado sobre la corrección atmosférica indicado en MODIS, como se señala en la figura IV-16.

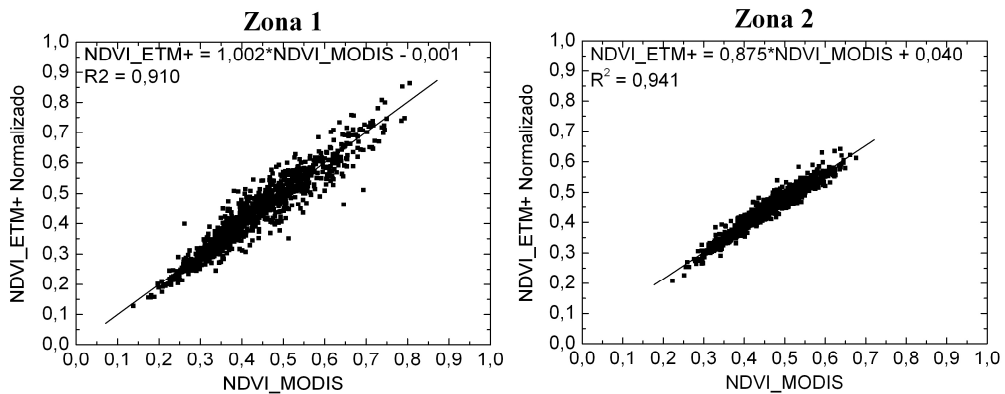
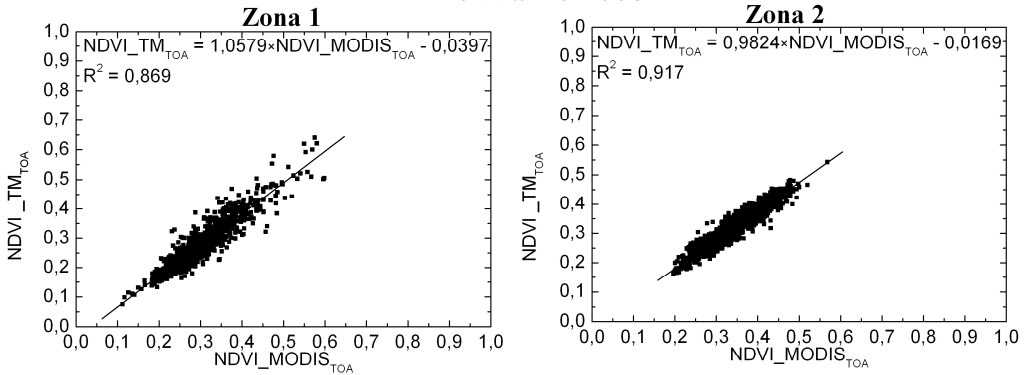


Figura IV.16. Comparación del NDVI_MODIS (BOA) con el NDVI_ETM+ corregido mediante una normalización de zonas invariantes (20 Mayo 2003), en ambas zonas y para la malla de 1000 m x 1000 m.

Sin embargo, la comparación de los NDVI_TOA entre sensores MODIS y Landsat se mantiene muy parecida y consistente en el tiempo entre ambas zonas, ver figura IV-17, indicando un similar registro de ambos sensores en el techo de la atmósfera, lo que reforzaría la hipótesis de que el diferencial que aporta la corrección atmosférica entre ambas zonas puede ser debido al procedimiento de cálculo. Posteriores investigaciones tenderán a analizar con mayor detalle los aspectos aquí señalados.

6 Marzo 2008



29 Agosto 2008

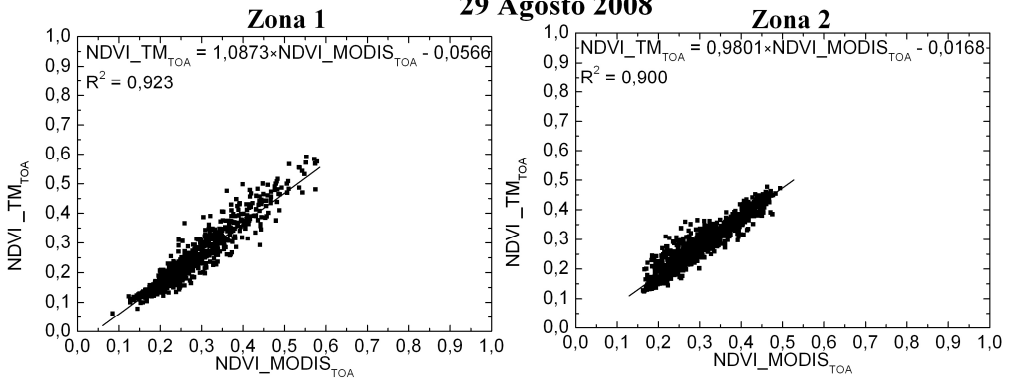


Figura IV.17. Comparación del NDVI de MODIS con el de TM, ambas sin corregir atmosféricamente, para la malla de 1000 m y para las fechas del 6 de Marzo y 29 de Agosto de 2008.

IV.6. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se ha trabajado con el concepto de constelación de sensores (definido como un conjunto de todos los satélites EO en órbita, que satisfacen unos requisitos comunes) para aplicaciones agrícolas y se proporciona la metodología necesaria en la calibración entre sensores, para las reflectividades espectrales y el NDVI. Con este objetivo, se ha llevado a cabo un estudio observacional, comparando reflectividades y NDVI a partir de pares de imágenes cuasi- sincrónicas de todos los elementos de nuestra constelación. El sensor ETM+ se considera el sensor de referencia.

La comparación de referencia, TM-ETM+ ha dado un triple resultado. En primer lugar, en dicha comparación, se indican errores en los coeficientes de calibración proporcionados en el fichero de cabecera de las imágenes y que confirman la solución (ver más adelante); y se identifica la incertidumbre en la georreferenciación como la principal causa de la dispersión de los datos. La última parte proporciona la base para derivar las recomendaciones sobre la agregación e inspira para desarrollar el *Método de zonas homogéneas* como una herramienta para derivar las ecuaciones estables de traslación entre sensores.

La comparación de pares de imágenes procedentes de otros sensores pertenecientes a nuestra constelación (LISS, ASTER, QuickBird, AVHRR, MODIS) ha permitido derivar ecuaciones lineales de traslación entre sensores y confirmar nuestra hipótesis y metodología relacionada con los efectos de la incertidumbre en la georreferenciación.

En conclusión, en este estudio de intercomparación, y específicamente lo que llamamos el método de zonas homogéneas, produce una intercalibración de TM para fechas previas a Chander and Markham (2003), además de demostrar que sus nuevos coeficientes tendrían que aplicarse al menos desde 2001. Por tanto, el *método de zonas homogéneas* es una valiosa herramienta para derivar nuestras ecuaciones de traslación entre sensores. En el capítulo V se aplicará a otros pares de sensores.

En resumen, se ha definido una constelación de EO satélites, con observaciones ceca del nadir, de interés para la agricultura de regadío y de precisión, los cuales son siempre de interés general para el seguimiento del estado de la vegetación y sus cambios. Basándonos en un estudio observacional de pares de imágenes sincrónicas o casi- sincrónicas, hemos derivado las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Se han encontrado relaciones lineales para la intercalibración de reflectividades y NDVI de un sensor a otro, llevando a cabo cierta agregación espacial. Usando ETM+ como el sensor de referencia, las ecuaciones lineales de traslación entre los sensores se derivaron para los elementos pertenecientes a nuestra constelación (tabla IV.7). Las ecuaciones lineales encontradas están en buen acuerdo con los resultados de Steven et al. (2003) basados en la simulación de los diferentes sensores.
2. La principal causa de dispersión de los datos para la obtención de dichas ecuaciones lineales entre sensores es la incertidumbre en la georreferenciación inherente en el proceso de la corrección geométrica. Consecuentemente, la agregación espacial necesita ser aplicada si (diferente o el mismo) los sensores son utilizados para derivar series temporales de parámetros biofísicos sobre áreas heterogéneas. Para sensores de la misma resolución espacial, el tamaño mínimo de agregación requerido es de 5x5 píxeles, en todos los demás casos es de 3x3 píxeles del sensor de menor resolución espacial. Esto implica que la resolución espacial efectiva de las imágenes Landsat (y por tanto para la constelación) sea de 90 m x 90 m (aproximadamente 1 hectárea).
3. Este requerimiento en la agregación espacial podría explicar algunas de las discrepancias entre las ecuaciones halladas y otras relaciones lineales publicadas (por ejemplo, Steven et al. 2003) con resultados de otros autores los cuales encontraron relaciones no lineales y dependientes del tipo de cobertura del suelo y de la composición de la superficie (por ejemplo, Huete et al. 2002; Miura et al. 2006). El método basado en la simulación de Steven et al. (2003) evita este problema asumiendo una superficie homogénea "ideal".
4. El método de corrección geométrica (convolución cúbica o vecino más próximo) no afecta para la estabilidad de las ecuaciones.
5. El *Método de zonas homogéneas* es recomendado como una excelente herramienta para derivar nuevas relaciones entre sensores, siempre que los cultivos homogéneos seleccionados cubran el rango completo de NDVI.
6. Las relaciones lineales derivadas de un par de imágenes son válidos para la misma estación y para todas las áreas con similar vegetación y clima. De todos modos se recomienda repetir el proceso una o dos veces al año con el fin de comprobar la estabilidad temporal de los coeficientes de calibración radiométricos.

7. Los productos de ASTER nivel L1B (más que L1A) son necesarios para la intercalibración, ya que estos han sido corregido por fallos observados en la calibración radiométrica durante ciertos periodos de tiempo. La desviación con respecto a la línea 1:1 podría ser debido a diferencias de las propiedades radiométricas entre los sensores ASTER y Landsat, mientras que en el caso del sensor LISS podría indicar una necesidad de ajuste de calibración.

- En lo que se refiere a la comparación de la normalización frente a la corrección atmosférica:

8. La comparación de la normalización por zonas invariantes frente a la corrección atmosférica se ha realizado comparando los NDVI de Landsat y MODIS en dos zonas diferentes, con diferentes usos de suelo para comprobar el comportamiento de dichos procesos.

9.- Los resultados muestran que la normalización y las correcciones atmosféricas aquí aplicadas, coinciden en las zonas agrícolas llanas, mientras que son ligeramente diferentes en las zonas de orografía compleja y vegetación natural. Este diferente comportamiento dependiendo de la zona se traduce en un efecto de sobreestimación del NDVI de la corrección atmosférica frente al proceso de normalización absoluta utilizado.

10.- El análisis efectuado señala que las correcciones atmosféricas efectuadas se pueden asemejar a una función lineal. Se ha encontrado que esta función lineal es diferente para cada una de las superficies consideradas, aunque pareciera razonable esperar una misma atmósfera en toda la imagen; así el efecto de sobreestimación de valores que se observa en la zona 2, en la que es predominante la vegetación natural, podría entonces deberse al procedimiento utilizado que sería dependiente de las características de la superficie. Obviamente sería necesario revisar en profundidad el procedimiento y proceder a comparar con medidas in situ, lo que escapa del alcance de este trabajo.

CAPÍTULO V: CONSTELACIÓN MULTISENSOR PARA EL SEGUIMIENTO TEMPORAL DE LA SUPERFICIE TERRESTRE.

La teledetección ofrece la oportunidad de controlar grandes áreas de superficies con un alto índice de repeticiones. Los parámetros relacionados con la cubierta vegetal obtenidos mediante Teledetección, son adecuados para detectar diferentes procesos, ya que cambios en la vegetación pueden estar ligados a causas subyacentes, como factores socio- económicos o cambios climáticos (Stellmes et al, 2010). El análisis de la serie temporal de imágenes de satélites es una importante herramienta para el seguimiento de la vegetación así como para la detección de cambios graduales en la cubierta vegetal. Si la serie temporal de imágenes es lo suficientemente densa, es posible la detección de cambios en la fenología.

En este capítulo se pretende construir y evaluar el rendimiento de una constelación de satélites de alta resolución temporal que incluye imágenes de Landsat 7, Landsat 5, DEIMOS1 y FORMOSAT para el seguimiento de la evolución temporal de los cultivos y vegetación natural durante un ciclo de crecimiento en el año 2010.

Todos estos sensores presentan diferente resolución espacial, diferentes anchos de banda y respuesta espectral. Su utilización conjunta, operando como una constelación multisensor que permita densificar las observaciones de la superficie terrestre, es el objetivo central de este capítulo.

En primer lugar se estudia la compatibilidad de los sensores utilizados para su integración en una constelación multisensor. Para ello, se lleva a cabo una serie de observaciones, en las que se comparan reflectividades y el índice de vegetación (NDVI), entre pares de imágenes sincrónicas o cuasi- sincrónicas, con el fin de evaluar si los valores de reflectividad y NDVI obtenidos desde diferentes sensores son similares, teniendo en cuenta que en las imágenes sincrónicas ambos están observando la misma superficie. Además se presta especial atención al comportamiento a lo largo del tiempo de dicha intercomparación.

En segundo lugar se ha procedido a obtener la secuencia de imágenes que permita el seguimiento temporal de la cubierta vegetal a lo largo del ciclo de crecimiento de 2010; las imágenes son aquellas adquiridas por los diferentes sensores que integran la constelación, y procesadas para su utilización conjunta independiente del sensor con el que han sido adquiridas. La carga de imágenes en el sistema web GIS SPIDER (<http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/>) permite su visualización y consulta, como se describe más adelante. Finalmente se procede a la evaluación de la capacidad de la secuencia temporal para describir adecuadamente la evolución de la cubierta vegetal, esto es el seguimiento de las diferentes fases fenológicas, lo que supone una herramienta de gran valor para una correcta gestión en espacios naturales y áreas agrícolas.

V.1 Sensores e imágenes utilizados

Para describir la evolución temporal de los cultivos y de la vegetación natural a lo largo de su ciclo de crecimiento que comienza en el mes de Abril, disponemos de una serie temporal formada por 26 imágenes de DEIMOS, 17 imágenes de Landsat- 5-TM y 23 de FORMOSAT. En la tabla V.1 se muestran los pares de imágenes usados en este capítulo y fechas de su adquisición. En la tabla V.2, mostramos las características de los sensores utilizados.

Del conjunto total de imágenes, se ha extraído un subconjunto de imágenes sincrónicas o cuasisincrónicas, en las que se ha incluido Landsat7-ETM+, tal y como se indica en la Tabla V.2; estas imágenes Landsat 7- ETM+ se han utilizado como referencia, dada su calidad radiométrica, pero no se han utilizado para la secuencia pues en la zona de estudio presenta los “gaps” originados por la avería en el sistema de corrección de giro del espejo.

Las imágenes utilizadas han sido geométrica, radiométrica y atmosféricamente corregidas por el IDR-UCLM (Landsat 5- TM, Landsat 7- ETM+ y DEIMOS) y

por CESBIO de Toulouse, en el marco de la misión VEN μ S (FORMOSAT-2) como ya se indicó en el capítulo II, para obtener reflectividades en el techo de la atmósfera, TOA y en la superficie, BOA. El NDVI se ha calculado para cada sensor utilizando las correspondientes bandas en el rojo y en el infrarrojo cercano. En el caso de las imágenes DEIMOS, no se ha aplicado a las reflectividades una corrección atmosférica, sino un procedimiento de normalización del NDVI (descrito en el capítulo II, apartado II.5.4), basado en el suelo desnudo y en la vegetación densa.

Dicho procedimiento ha consistido en: (a) Cálculo de NDVI_TOA DEIMOS mediante los coeficientes de calibrado suministrados por DEIMOS y (b) Aplicación del proceso de normalización. Operando de esta forma hemos obtenido los valores NDVI DEIMOS en la superficie por normalización, que llamamos NDVI_BOA DEIMOS. Las variables que se han comparado con cada par de sensores y en cada fecha, también se indican en la tabla V.1.

TablaV.1. Pares de sensores y fechas disponibles para la intercomparación, así como las variables comparadas en cada caso.

<i>Fechas</i>	<i>Pares de sensores</i>	<i>Variables comparadas</i>
03/10/2009 19/10/2009	FORMOSAT 2/Landsat 5 TM	Reflectividad Rojo_ TOA Reflectividad Rojo_BOA Reflectividad Infrarrojo_ TOA Reflectividad Infrarrojo_ BOA NDVI_TOA; NDVI_BOA
11/02/2010 09/03/2010	DEIMOS UKDMC2/FORMOSAT 2	Reflectividad Rojo_ TOA Reflectividad Infrarrojo_ TOA NDVI_TOA; NDVI_BOA
30/03/2010	DEIMOS 1/FORMOSAT 2	NDVI_TOA; NDVI_BOA
15-13/03/2010	DEIMOS UKDMC2 /Landsat 7- ETM+	NDVI_TOA; NDVI_BOA
16-17/05/2010	DEIMOS 1/Landsat 7- ETM+	Reflectividad Rojo_ TOA Reflectividad Infrarrojo_ TOA NDVI_TOA; NDVI_BOA

TablaV.2. Características de los sensores utilizados en la constelación.

<i>Sensor</i>	<i>Ciclo(días)</i>	<i>Escena (km)</i>	<i>Bandas utilizadas/rango espectral(μm)</i>	<i>Pixel (metros)</i>
Landsat5	16	172x185	VIS B3 0.63-0.69 NIR B4 0.76-0.90	30
Landsat7	16	170x183	VIS B3 0.63-0.69 NIR B4 0.76-0.90	30
DEIMOS	7	498x600	VIS B2 0.63-0.69 NIR B1 0.77-0.90	20
FORMOSAT2	1	24x24	VIS B3 0.63-0.69 NIR B4 0.76-0.90	8

V.2 Intercomparación entre imágenes cuasi-síncronas y discusión

La disponibilidad de imágenes sincrónicas o cuasi-sincrónicas permite evaluar en ellas las observaciones de diferentes sensores, teniendo en cuenta que es esperable que las reflectancias y el NDVI de la superficie terrestre permanezcan constante dado el pequeño intervalo de tiempo que transcurre de una imagen a otra. En este apartado se van a mostrar los resultados de la comparación realizada entre pares de imágenes sincrónicas de sensores, comparando reflectividades TOA, reflectividades BOA, así como NDVI_TOA y NDVI_BOA. La hora de adquisición de las imágenes es similar, alrededor de las 10.30 h, TMG, lo cual garantiza una similar iluminación solar.

Para proceder a la intercomparación entre sensores, se aplica la metodología desarrollada en el capítulo III y es necesario establecer las observaciones con una malla en una zona geográfica común a todos ellos como ya se aplicó en los capítulos III y IV. En este caso, la zona es limitada por el tamaño de las imágenes de FORMOSAT ya que son las de menor tamaño, alrededor de 24 km x 24 km y la coordenada superior izquierda de la malla es (573000, 4333420).

Con el fin de reducir la incertidumbre debida al diferente tamaño de píxeles y a la georreferenciación de las imágenes, se crea una malla cuyas celdas tienen un tamaño de 3 x 3 píxeles del sensor de menor resolución espacial (90 x 90 m o 60 x 60 m para los pares de imágenes con Landsat o DEIMOS respectivamente). Por tanto, el tamaño de cada celda determina el número de píxeles que se van a agregar de cada imagen. Para incrementar la exactitud en la superposición de la

mailla vectorial sobre la imagen ráster, los datos estadísticos obtenidos de cada celda de la mailla son realizados a un tamaño de 1 m en la herramienta del Sistema de Información Geográfica (Arc Map).

Al igual que en capítulos anteriores, los resultados de las comparaciones entre los pares de sensores son mostrados usando la representación gráfica donde se representan los datos de reflectividad y NDVI, incluido el ajuste lineal, el cual nos va a dar las ecuaciones de traslación entre sensores.

V.2.1 Comparación de FORMOSAT vs Landsat 5

Se ha procedido a realizar las comparaciones de las distintas observaciones procedentes de FORMOSAT- 2 y Landsat 5- TM. En la tabla V.1 se han indicado las fechas correspondientes a este par de sensores y las variables para su comparación. En la figura V.1 se muestra un ejemplo de los resultados de dicha comparación. En este caso se trata de la reflectividad en el rojo, en el infrarrojo y el NDVI, TOA en todos los casos. En las tablas V.3a y V.3b se indican los parámetros del ajuste lineal entre dicho par de sensores, para las reflectividades y el NDVI, tanto TOA como BOA.

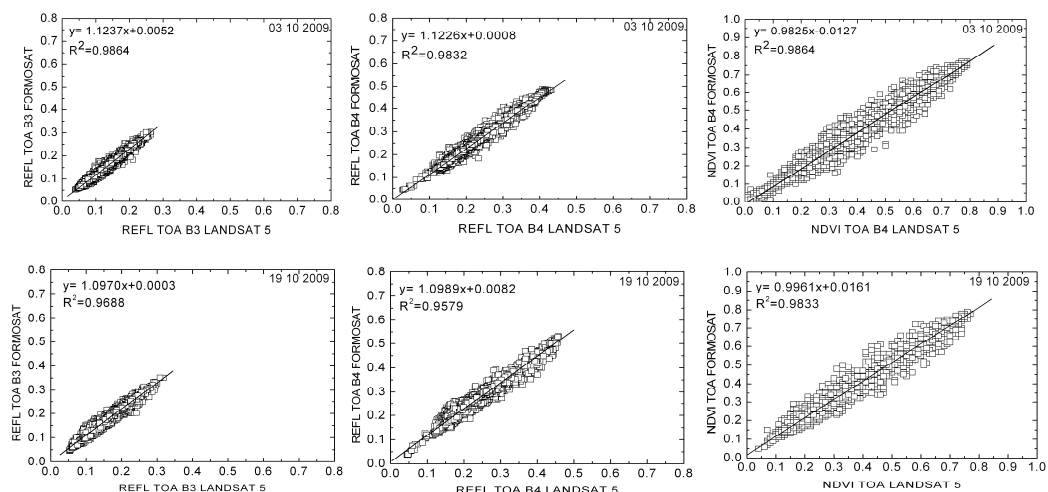


Figura V.1. Comparación de FORMOSAT y Landsat 5- TM de (a) Reflectividad TOA en el rojo; (b) Reflectividad TOA en el infrarrojo y (c) NDVI TOA, para las 2 fechas disponible de este par de sensores.

Tabla V.3a. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos NDVI entre FORMOSAT y Landsat 5.

Fechas	NDVI					
	a		b		R ²	
	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA
03/10/2009	-0.01	+0.02	0.98	0.94	0.99	0.98
19/10/2009	-0.01	-0.01	0.99	0.94	0.99	0.98

$$NDVI_{FORMOSAT} = a + b * NDVI_{Landsat\ 5}$$

Tabla V.3b. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos reflectividades (rojo e infrarrojo) entre FORMOSAT y Landsat 5.

Fechas	REFLECTIVIDAD ROJO						REFLECTIVIDAD INFRARROJO					
	a		b		R ²		a		b		R ²	
	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA
03/10/2009	+0.01	+0.00	1.12	0.88	0.99	0.99	+0.00	-0.01	1.12	0.85	0.98	0.99
19/10/2009	+0.00	+0.01	1.10	0.79	0.97	0.98	+0.01	+0.01	1.10	0.80	0.96	0.97

$$Reflectividad_{FORMOSAT} = a + b * Reflectividad_{Landsat\ 5}$$

En lo que se refiere a las gráficas de la figura V.1 se puede ver que la dispersión de los puntos podría ser debido a la incertidumbre en la georreferenciación, sobre todo en los bordes de las parcelas de cultivos homogéneos, así como a diferencias en el ángulo de iluminación y de visión. La desviación con respecto a la línea 1:1 probablemente sea debido a los parámetro de calibración y a las diferencias en el ancho de banda y función de respuesta espectrales.

En las tabla V.3a y V.3b, se ve como todas las comparaciones muestran un buen ajuste lineal, con un coeficiente de correlación cercano a 1 (R² va desde 0.94 a 0.99) y similares coeficientes de la ecuación lineal. Por tanto, la comparación entre los sensores FORMOSAT y Landsat 5 muestra un buen ajuste, especialmente en la comparación del NDVI, aunque las ligeras diferencias observadas en las reflectividades BOA, pueden estar originadas por los diferentes métodos de corrección atmosférica aplicados.

V.2.2 Comparación de DEIMOS vs FORMOSAT

En este apartado se describe la comparación realizada entre los sensores DEIMOS 1- DMC, DEIMOS UKDMC2 y FORMOSAT-2. En la figura V.2 se muestran la comparación entre dichas observaciones para una de las fechas analizadas. Como ya comentamos anteriormente en el apartado V.1, en el caso de las imágenes DEIMOS, no se ha podido evaluar las reflectividades BOA al no disponer de ellas, aunque se aplica un procedimiento de normalización del NDVI. En las tablas V.4a y V.4b se muestran los coeficientes de la ecuación lineal entre dicho par de sensores, para las reflectividades TOA y para el NDVI, tanto TOA como BOA.

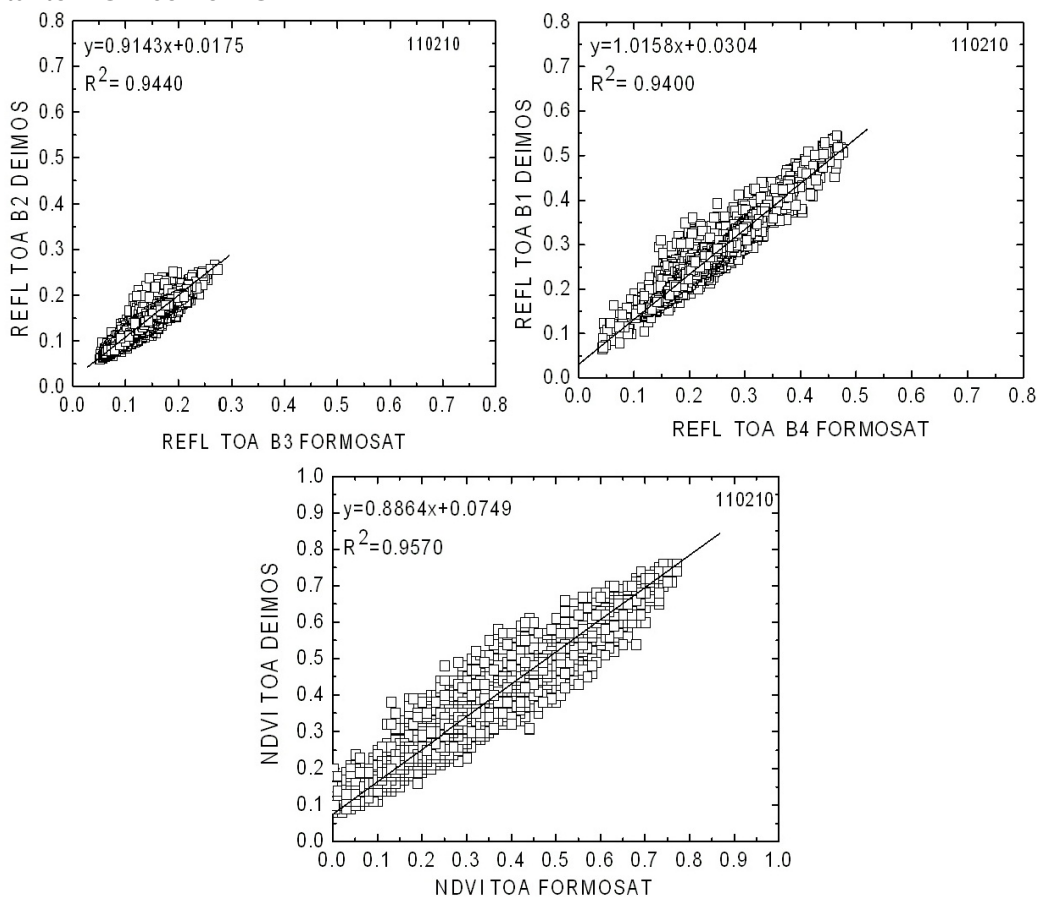


Figura V.2. Comparación de DEIMOS y FORMOSAT de (a) Reflectividad TOA en el rojo; (b) Reflectividad TOA en el infrarrojo y (c) NDVI TOA, para la fecha del 11 de Febrero de 2010.

Tabla V.4a. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos NDVI entre DEIMOS y FORMOSAT.

Fechas	NDVI					
	a		b		R ²	
	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA
11/02/10	+0.0749	-0.0530	0.8864	0.9559	0.9570	0.9574
09/03/10	+0.0723	-0.0260	0.8846	1.0058	0.9402	0.9585
30/03/10	+0.0673	+0.0116	0.8535	0.9543	0.9688	0.9603

$$NDVI_{DEIMOS} = a + b * NDVI_{FORMOSAT}$$

Tabla V.4b. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos reflectividades (rojo e infrarrojo) entre DEIMOS y FORMOSAT.

Fechas	REFLECTIVIDAD ROJO						REFLECTIVIDAD INFRARROJO					
	a		b		R ²		a		b		R ²	
	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA
11/02/2010	+0.018	-----	0.914	-----	0.944	-----	+0.030	-----	1.016	-----	0.940	-----
09/03/2010	-0.003	-----	1.036	-----	0.954	-----	-0.032	-----	1.052	-----	0.945	-----
30/03/2010	+0.022	-----	1.047	-----	0.962	-----	+0.065	-----	1.022	-----	0.958	-----

$$Reflectividad_{DEIMOS} = a + b * Reflectividad_{FORMOSAT}$$

Al igual que se comentó en el apartado anterior, todas las comparaciones muestran un buen ajuste lineal, con un coeficiente de correlación cercano a 1 y similares coeficientes de la ecuación lineal, sobretodo cuando se trata del NDVI. En la tabla V.4a se puede ver como se obtiene un mejor ajuste lineal en el caso de tener las imágenes de NDVI normalizadas.

V.2.3 Comparación de DEIMOS vs Landsat- 7.

La última de las comparaciones que se muestran en este capítulo es con el par de sensores DEIMOS y Landsat 7- ETM+. Al igual que en el apartado anterior al tratarse de imágenes DEIMOS se realiza la comparación con las reflectividades TOA y con el NDVI tanto TOA como BOA (NDVI normalizado en el caso de DEIMOS).

En la figura V.3 se muestra un ejemplo la comparación entre observaciones procedentes de los sensores DEIMOS y Landsat 7, para una de las fechas analizadas. En las tablas V.5a y V.5b se muestran los coeficientes de la ecuación

lineal entre dicho par de sensores, para las reflectividades TOA para una de las fechas y para el NDVI, tanto TOA como BOA.

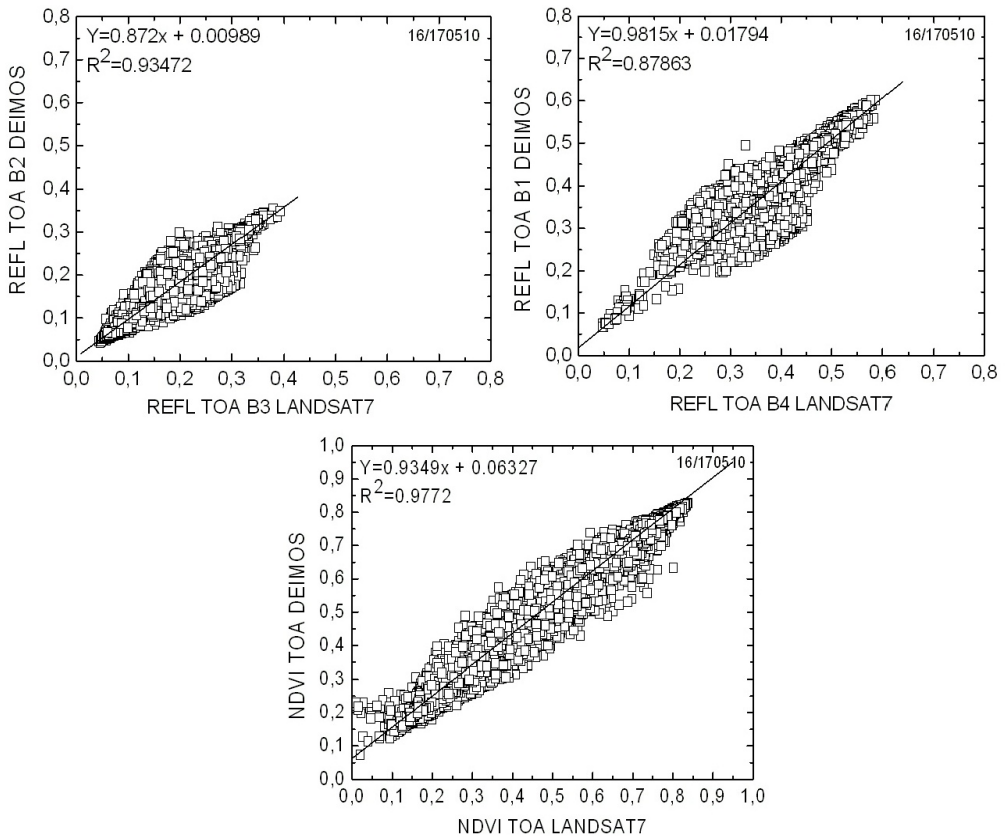


Figura V.3. Comparación de DEIMOS y Landsat 7 de (a) Reflectividad TOA en el rojo; (b) Reflectividad TOA en el infrarrojo y (c) NDVI TOA, para las fechas del 16 y 17 de Mayo de este par de sensores.

Tabla V.5a. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos NDVI entre DEIMOS y Landsat 7.

Fechas	NDVI					
	a		b		R ²	
	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA
13-15/03/2010	+0.0260	+0.0014	0.9950	0.9743	0.9465	0.9361
16-17/05/2010	+0.0633	+0.0208	0.9349	0.9562	0.9772	0.9762

$$NDVI_{DEIMOS} = a + b * NDVI_{Landsat\ 7}$$

Tabla V.5b. Coeficientes de la ecuación lineal obtenidos cuando comparamos reflectividades (rojo e infrarrojo) entre DEIMOS y Landsat 7.

Fechas	REFLECTIVIDAD ROJO						REFLECTIVIDAD INFRARROJO					
	a		b		R ²		a		b		R ²	
	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA	TOA	BOA
16-17/05/2010	+0.010	----	0.872	---	0.935	----	+0.018	----	0.982	----	0.879	----

$$Reflectividad_{DEIMOS} = a + b * Reflectividad_{Landsat\ 7}$$

V.3 Conclusiones generales de nuestra comparación

Si consideramos el total de pares de imágenes analizadas, las relaciones entre sensores muestran un alto grado de estabilidad temporal y un ajuste lineal próximo a la línea 1:1, con parecidos coeficientes de la ecuación lineal, sobretodo cuando se trata del NDVI, aunque con ligeras diferencias como observamos en las tablas V.3 -V.6. Esta estabilidad temporal en la comparación entre sensores, parece sostener la posibilidad de construir una constelación de satélites con sensores de alta resolución espacial, debido al ajuste entre las observaciones procedentes de los sensores utilizados.

Este acercamiento entre sensores requiere un componente que desarrolle la capacidad de combinar datos de diferentes fuentes para formar distintos productos biofísicos. Dicho acercamiento debe tener en cuenta las diferencias entre sensores tales como diferencias en la resolución espacial, en los anchos de banda espectrales y de localización, en la hora de adquisición y en los ángulos de visión (Wulder et al, 2008). Aun así, hay aspectos que no se han tenido en cuenta

y pueden dificultar el uso de una constelación multisensor. Además de la corrección atmosférica hay aspectos como los efectos bidireccionales debidos al ángulo de observación del sensor que deberían corregirse y por tanto, aunque el camino hacia una constelación multisensor está abierto, todavía hay muchos aspectos a tener en cuenta.

V.4 Una constelación multisensor: seguimiento temporal de cubiertas vegetales tipo y comportamiento de la constelación

Aunque las observaciones entre sensores son comparables, como se ha puesto de manifiesto anteriormente, subsisten diferencias debido a la diferente resolución espacial, ancho de banda espectral de los sensores y localización, hora de adquisición y ángulo de visión. A pesar de esas diferencias, la disponibilidad de una serie temporal de imágenes a lo largo del año 2010 de los sensores FORMOSAT (23 imágenes), Landsat5-TM (17 imágenes) y DEIMOS (26 imágenes), sobre un mismo ámbito espacial, permitió abordar la construcción de una constelación multisensor basada en dichas imágenes, y evaluar así la capacidad de describir la evolución de la cubierta vegetal, así como el desempeño de la propia constelación.

Construir la constelación con imágenes de diferente resolución espacial no solamente consiste en disponer de una serie de imágenes de varios sensores con corrección geométrica, radiométrica y atmosférica, sino que se necesita el software que permita desplegar gráficamente la evolución temporal de una cubierta vegetal en el tiempo y acceder de forma interactiva a dichas imágenes.

Los avances realizados en herramientas del tipo Infraestructuras de Datos Espaciales permiten abordar este reto, de tal forma que se puede acceder a catálogos de imágenes a través de servidores, sin necesidad de disponer de software específico en el terminal del usuario. De esta forma sería posible proceder a la consulta desde cualquier terminal con conexión a internet.

La herramienta SPIDER, desarrollada en el proyecto europeo PLEIADeS, reúne las características técnicas que permiten la construcción de esta constelación.

V.4.1 Herramienta SPIDER

SPIDER es una web, que ha sido desarrollada basándose en las nuevas tecnologías como un servidor central de datos donde los diferentes usuarios

pueden cargar distintos tipos de capas (vectorial, raster, alfanumérico...), y servir de ayuda a distintos grupos académicos y de investigación implicados en proyectos para la gestión del agua.

Uno de los pilares básicos de este software es el uso de tecnologías de observación de la Tierra (*Earth Observation Technologies, EO Technologies*) para cubrir grandes superficies, con unas cuantas imágenes y utilizar satélites de diferente resolución, que proporcionan una herramienta de alto potencial para la gerencia del agua. Como ya se ha demostrado en otros proyectos tales como DEMETER, la evolución temporal de cultivos obtenida mediante imágenes de satélites, es esencial para la gestión del agua de riego (Moreno- Rivera et al., 2008)

La evolución temporal de los cultivos se visualiza en gráficas interactivas que permiten la acumulación en el eje temporal. Las distintas capas utilizadas consisten en un mosaico de imágenes dinámico con un componente espacial y temporal, que cubre diferentes áreas en diferentes fechas, haciendo posible el análisis temporal de los datos.

Los datos son analizados a través de las series temporales que permiten al usuario un rango de fechas y acumular los valores (puntos) a lo largo del tiempo.

Estos gráficos permiten acumular valores de forma dinámica desde un punto a otro arrastrando el ratón sobre el gráfico y comparar las diferentes evoluciones temporales desde distintos puntos, siendo posible comparar los diferentes tipos de cultivos o el mismo cultivo en diferentes regiones. El tamaño de la cuadrícula para la comparación es definido por el usuario y el resultado es el valor medio de todos los píxeles incluidos en dicha cuadrícula. De esta manera se reduce el error debido a la resolución del sensor y cada imagen tiene su punto correspondiente en el gráfico.

La arquitectura de SPIDER, ha permitido desarrollar dos tipos de usuarios, uno con fines administrativos con la presentación de varias ventanas interfaz que ofrece a un usuario avanzado la posibilidad de mostrar varios mapas, varias listas o tablas. También tiene la interfaz administrativa que permite al administrador definir usuarios y grupos nuevos y decidir qué capas pueden acceder a qué grupos o usuarios. La otra versión de la interfaz de cliente es una interfaz más atractiva para una explotación avanzada de información, proporcionando un conjunto de herramientas muy fáciles de usar sin necesidad de conocimientos de alto nivel sobre tecnología SPIDER, combinando la información de gráficos

interactivos con mapas, tablas y la creación de informes para ayudar a los usuarios en la toma de decisiones.

Las dos formas más importantes de SPIDER para ayudar a los usuarios se pueden resumir en:

- a) El sistema ofrece una amplia cobertura de tierra y de datos aprovechando la herramienta de seguimiento basada en los datos de EO y mapas de uso de suelo, así como para la planificación de distribución de agua para las campañas siguientes.
- b) El sistema indica el nivel de riego como un proceso en tiempo real, los agricultores pueden seguir la evolución de sus diferentes cultivos sabiendo en cada momento la cantidad de agua que necesita, problemas en sistemas de riego, las enfermedades de los cultivos, etc..

En la figura V.4 se muestra un ejemplo de cómo se usa dicha herramienta y como se obtiene la evolución fenológica de cada cultivo.

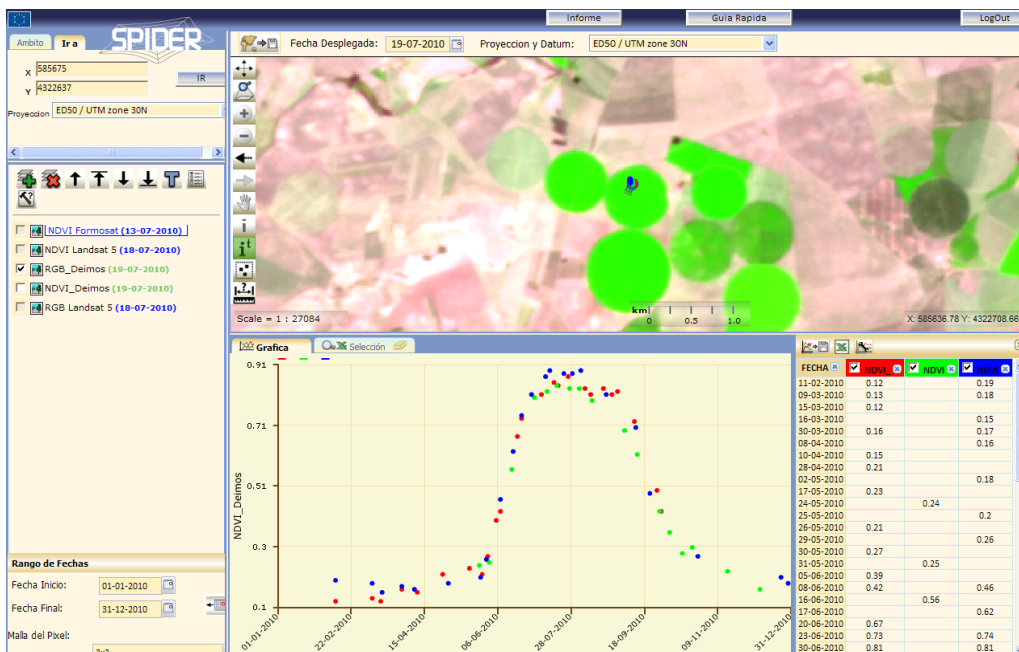


Figura V.4. Captura de pantalla de la herramienta Spider. Sobre una composición RGB realizada con Landsat 5, se ha obtenido la evolución fenológica en un pivot de maíz a través de los valores de NDVI, donde disponemos de imágenes del año 2010 de los sensores DEIMOS-1, Landsat 5- TM y FORMOSAT 2.

Como puede observarse en la figura V.4, una de las capas de información es un mosaico de imágenes de combinación RGB 543 que cubre diferentes áreas en diferentes fechas, realizada con las bandas de Landsat 5, la cual facilita, visualmente hablando, la selección de parcelas donde obtener la evolución del NDVI. La evolución temporal del cultivo, en este caso de maíz, se visualiza en una gráfica interactiva que se acumula en el eje temporal.

Otra de las capas disponibles en dicha herramienta es la clasificación de cultivos. La clasificación de cultivos es una de las aplicaciones de nuestra constelación multisensor. Dicha clasificación se inicia aplicando un algoritmo de máxima probabilidad y se va mejorando incorporando información de otras fechas. La selección de las denominadas parcelas de entrenamiento necesarias

para el algoritmo se realiza en base al conocimiento preexistente de los patrones temporales y trabajo de campo.

La incorporación de otras fechas se realiza mediante árboles de clasificación. El conocimiento de la evolución temporal aportado por la secuencia de imágenes permite seleccionar los momentos y valores para aplicar los umbrales necesarios. El procedimiento utilizado permite introducir la dinámica de los cultivos en la clasificación. (Belmonte et al, 2011)

V.5.2 Evolución temporal de cubiertas vegetales tipo

La densificación del número de imágenes disponible para el seguimiento de la evolución de las cubiertas vegetales es una de las más importantes potencialidades del uso de la constelación.

Dado que el NDVI es el parámetro más frecuentemente utilizado para describir la evolución fenológica de la cubierta vegetal, es el que se ha seleccionado para visualizar las observaciones desde los diferentes sensores. Este índice nos permite discernir entre los diferentes cultivos en base a su diferente patrón temporal, y que se va a utilizar en imágenes de diferentes sensores, tales como Landsat, DEIMOS y otros que pudieran estar disponibles como FORMOSAT, es necesario disponer de un procedimiento que permita la obtención de un producto NDVI de la superficie, aplicable a diferentes sensores, y que permita su intercomparación. Las series temporales obtenidas a través de una constelación multisensor, puede ser una poderosa herramienta para el seguimiento del cultivo a lo largo de su crecimiento.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el procedimiento para la obtención de la evolución del NDVI de cada uno de esos tipos de suelo ha sido llevado a cabo mediante la herramienta Web-SIG SPIDER. Este sistema permite visualizar la evolución temporal de las parcelas estudiadas, desplegando de forma gráfica los valores del NDVI frente al tiempo. La serie temporal de imágenes así obtenida permite describir de forma precisa la evolución de cultivos y vegetación natural a lo largo de sus ciclos de crecimiento.

En la tabla V.6 se muestran las coordenadas y cultivos presentes en las parcelas en las que se ha obtenido la evolución del NDVI. La mayoría de la información ha sido obtenida del trabajo de campo disponible de la zona de estudio realizado por la Junta Central de Regantes correspondientes al año 2010,

otras han sido seleccionadas por el conocimiento de la zona y también por la clasificación supervisada.

Tabla V.6. Tipos de usos de suelo y coordenadas del centro de las parcelas en las cuales se ha obtenido la evolución del NDVI.

TIPO DE USO DE SUELO	COORDENADA X	COORDENADA Y
Adormidera	598670	4325830
Ajo chino	574800	4313480
Ajo morado	578540	4310840
Alfalfa	576070	4324710
Cebada	605340	4328330
Trigo-Maíz Forrajero	589760	4314550
Girasol	597790	4328370
Lechuga (2 cosechas)	586000	4312000
Lenteja	596900	4322100
Maíz	585674	4322637
Patata	572380	4321320
Sandía	583380	4305650
Trigo	603780	4329280
Matorral	582521	4318153
Forestal	649370	4328920
Nogal	612330	4343500
Viña	588780	4347861

En la figura V.5 mostramos la evolución temporal de los índices de vegetación para diferentes cultivos y cubiertas vegetales presentes en nuestra zona de estudio, como son cebada, ajos, adormidera, cebolla, lechuga, maíz, sandía, doble cosecha trigo-maíz, matorral, nogal y forestal.

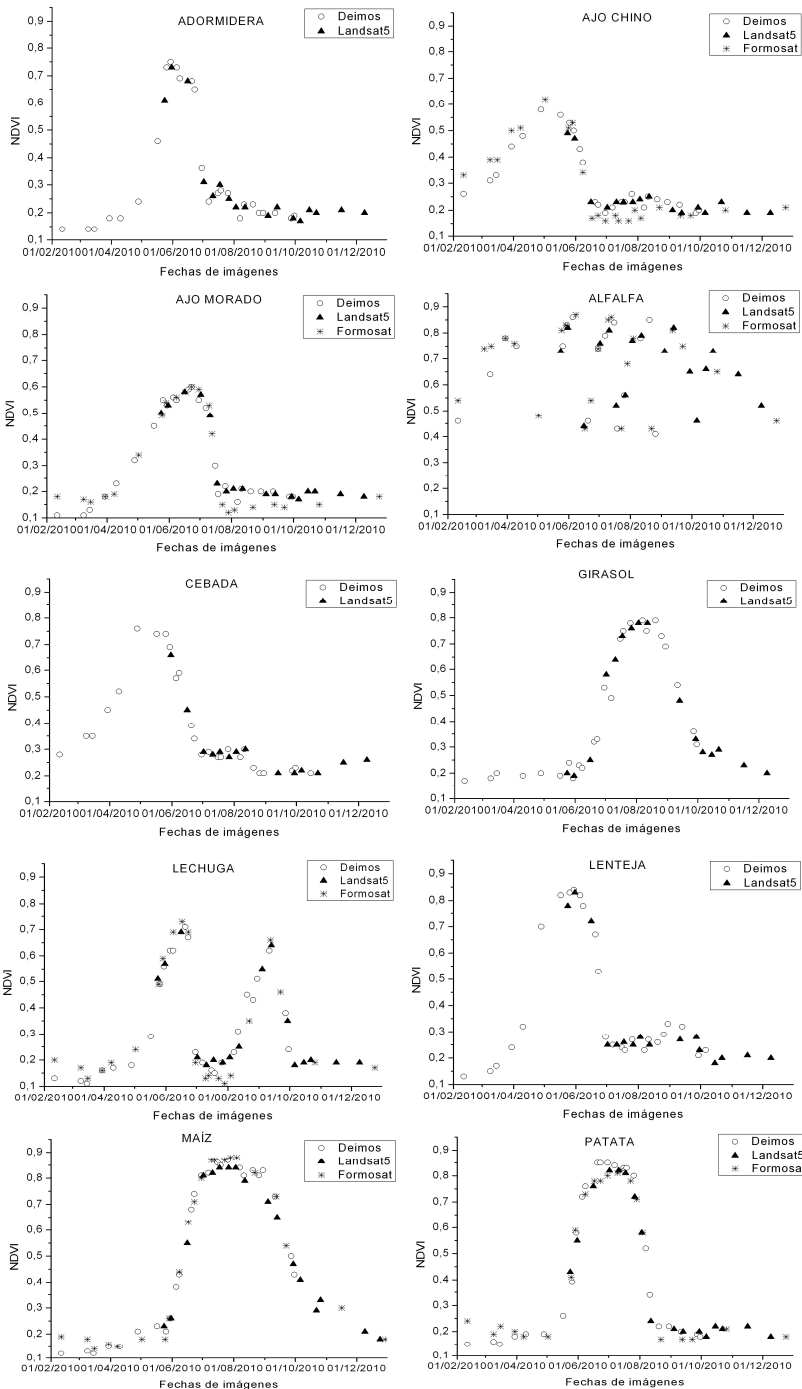
Cada cultivo o clase de cultivos presenta características bien diferenciadas en función de la duración de estos periodos, época del año en la que ocurren y valores máximos del NDVI que se alcanzan durante la meseta, período en el que se alcanza la máxima cobertura de la vegetación.

Para el estudio de la evolución general de los cultivos, el ciclo agronómico de los cultivos se divide en cuatro etapas (Doorenbos y Pruitt, 1977):

- 1.- La etapa de establecimiento, que abarca la germinación, nascencia y estados iniciales de los cultivos, cuando el porcentaje de cubrición del suelo es inferior al 10%. Esta etapa corresponde al suelo desnudo.
- 2.- La etapa de crecimiento vegetativo rápido, que transcurre desde que el cultivo se ha establecido hasta que cubre en un 60-80% del terreno y alcanza su máximo valor el Índice de Área Foliar, LAI (*Leaf Area Index*).
- 3.- La etapa de mediados del ciclo, que transcurre desde que el cultivo alcanza su máximo LAI y cubre totalmente el terreno hasta la fecundación e inicio de la formación de la cosecha. Al final de esta etapa surgen variaciones en el color de las hojas o se inicia la senescencia foliar.
- 4.- La etapa final del ciclo agronómico del cultivo, que se inicia en el final de la etapa anterior y acaba con la maduración fisiológica y la sobremaduración de la cosecha (Martín de Santa Olalla F.J., de Juan Valero J.A., 1992).

Las ligeras diferencias encontradas no son solamente debido a las diferentes características de los sensores, sino también a efectos locales no corregidos, a la heterogeneidad de la superficie y a los efectos bidireccionales de la reflectividad (Calera et. al, 2010 b). También se han eliminado algunos de los puntos debido a la presencia de nubes en la zona de estudio.

Constelación multisensor para el seguimiento temporal de la superficie terrestre



Constelación multisensor para el seguimiento temporal de la superficie terrestre

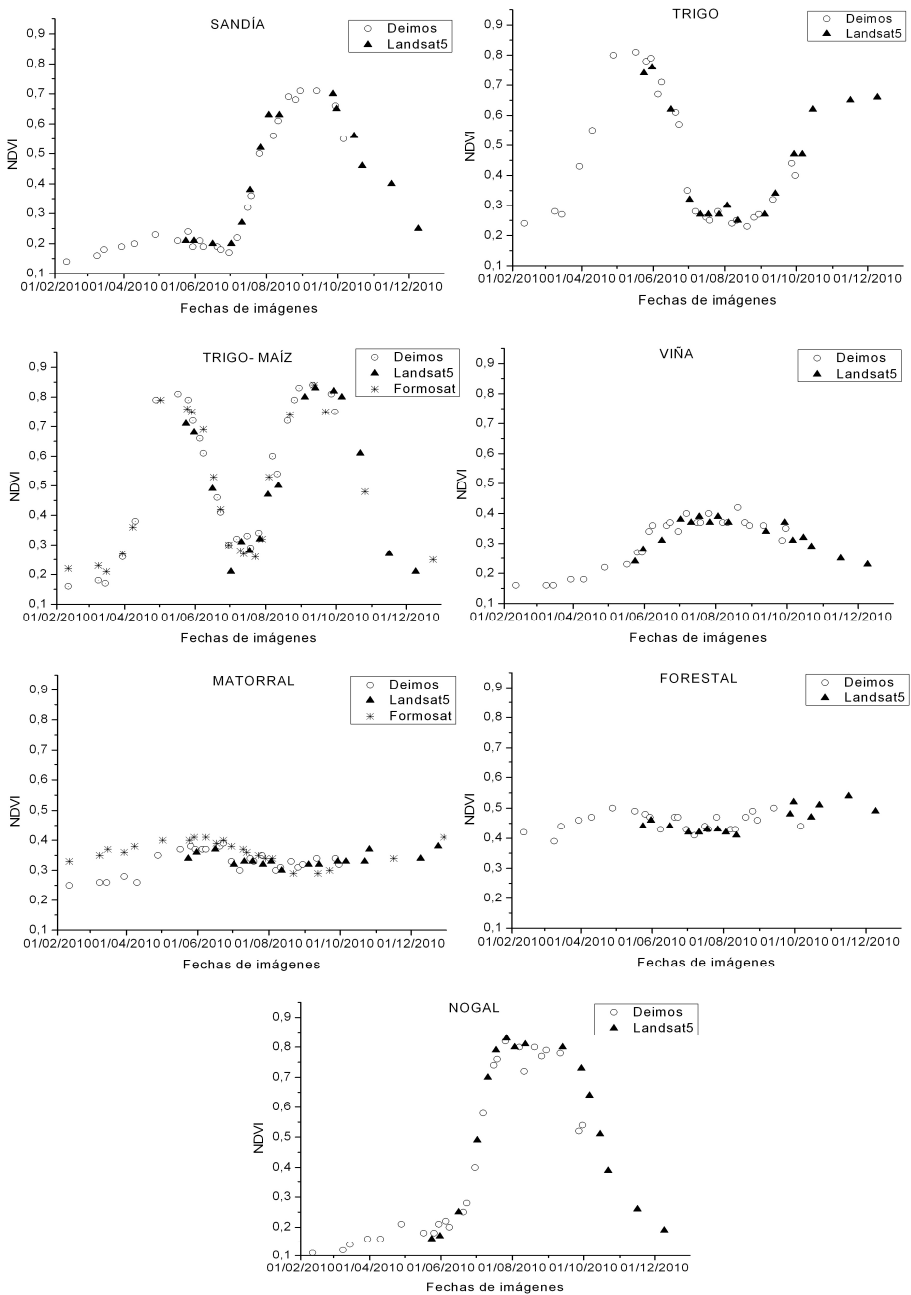


Figura V.5. Evolución temporal del NDVI en diferentes cubiertas vegetales, a partir de los sensores DEIMOS- DMC, Landsat 5 y FORMOSAT-2. (Herramienta Spider, proyecto PLEIADEs).

Como podemos observar en la figura V.5, a pesar del elevado número de imágenes utilizadas, la utilización de un único sensor no basta para describir completamente la evolución del cultivo. Las imágenes de DEIMOS cubren el periodo de cultivos de primavera y las de Landsat 5, van más allá de los periodos de crecimiento de los cultivos. En el caso de FORMOSAT, se disponen de imágenes repartidas a lo largo del año, pero no disponemos de datos en todos los cultivos analizados, al cubrir una zona menos extensa. El periodo coincidente nos permite la intercomparación e intercalibrado de los diferentes sensores.

Por tanto, el uso de una constelación de sensores, capaz de facilitar una imagen semanal permite el seguimiento completo de la dinámica temporal de los cultivos y cubiertas presentes en el área de estudio. La completa caracterización del patrón temporal y su correspondencia con un cultivo o grupo de cultivos permite utilizar el patrón temporal como criterio básico de clasificación, para realizar así el inventario de cultivos (Belmonte et al, 2011).

V.5.3 Comportamiento de la constelación en el seguimiento de la vegetación.

Para evaluar el rendimiento de nuestra constelación de sensores, realizaremos el seguimiento de una parcela a lo largo del tiempo con cada uno de los sensores y evaluaremos el comportamiento de éstos.

Los valores de NDVI para cada uno de los sensores en cada fecha y en cada parcela, se obtendrán en una zona común de muestreo, con un promedio de 8 puntos (cada uno de 3x3 píxeles), para cada uno de los sensores.

Utilizaremos de base el sensor FORMOSAT, del cual disponemos de imágenes a lo largo del año e interpolaremos los datos, para disponer de datos a diario. Una vez interpolados los datos para FORMOSAT, se representarán junto a los valores obtenidos en esa misma parcela de los otros sensores, para ver cuál es el comportamiento de cada sensor frente al otro y para poder analizar posibles errores de procesado u otros aspectos.

Este seguimiento lo hemos realizado en 2 parcelas, una de regadío de verano y otra de regadío de primavera. En cada una de ellas se ha realizado la comparación entre los pares de sensores FORMOSAT- DEIMOS y FORMOSAT- Landsat, como mostramos en las figuras V.6 y V.7.

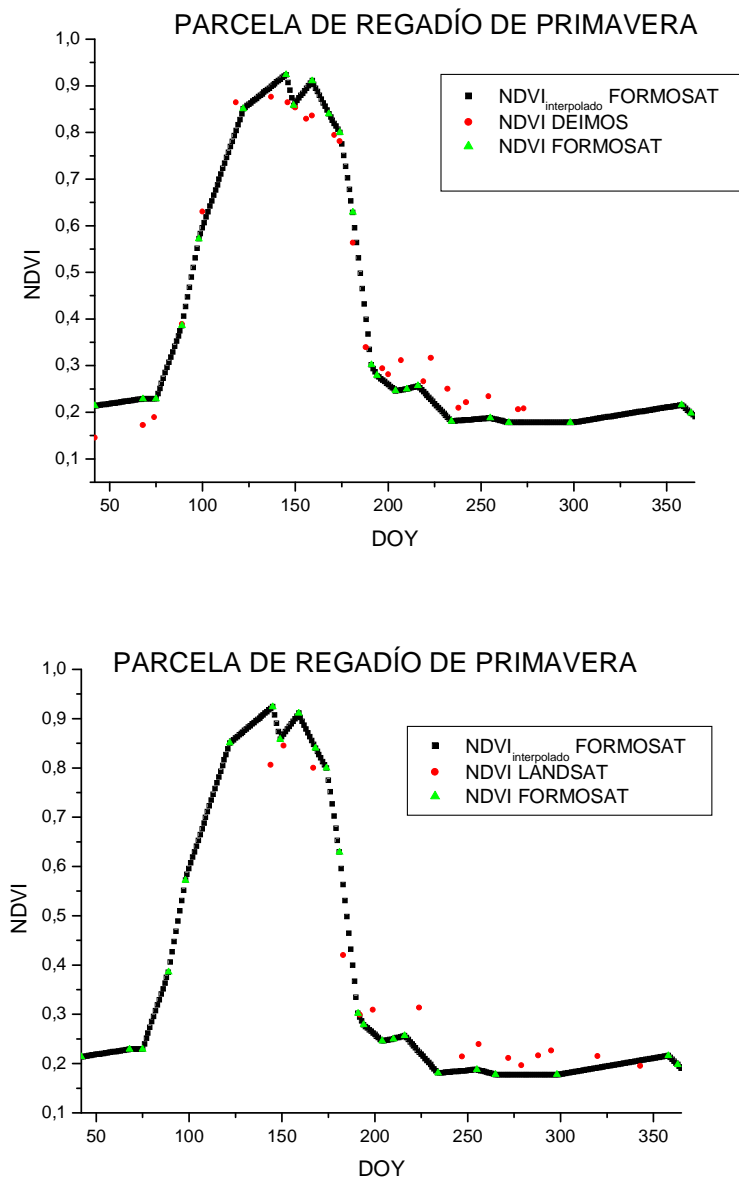


Figura V.6. Seguimiento del NDVI en una parcela de regadío de primavera. En la gráfica superior se muestra la evolución de FORMOSAT interpolando los datos existentes para todos los días del año, junto con los datos existentes de DEIMOS. En la inferior se muestran junto a los datos de Landsat.

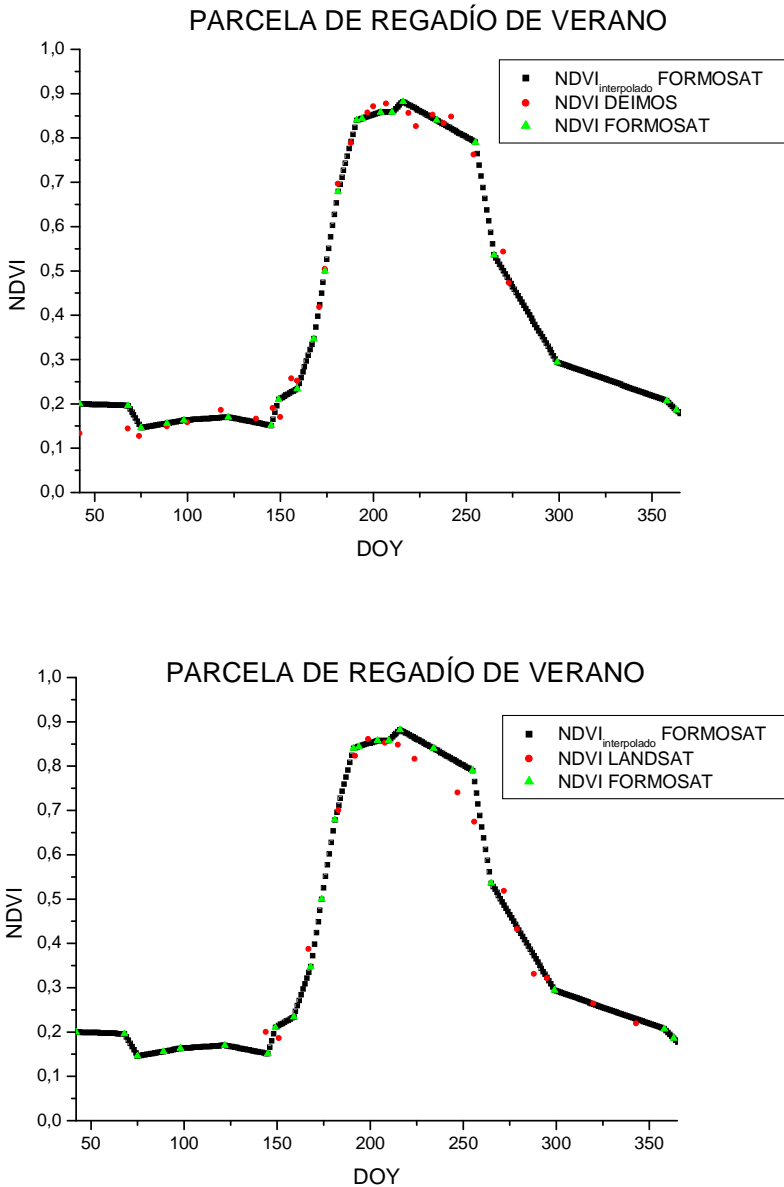


Figura V.7. Seguimiento del NDVI en una parcela de regadío de verano. En la gráfica superior se muestra la evolución de FORMOSAT interpolando los datos existentes para todos los días del año, junto con los datos existentes de DEIMOS. En la inferior se muestran junto a los datos de Landsat.

A partir de los datos creados en estas parcelas de seguimiento, se han representado los valores de NDVI en aquellos días a lo largo del año en que coinciden ambos sensores para su comparación, tal y como puede observarse en las figuras V.8 y V.9.

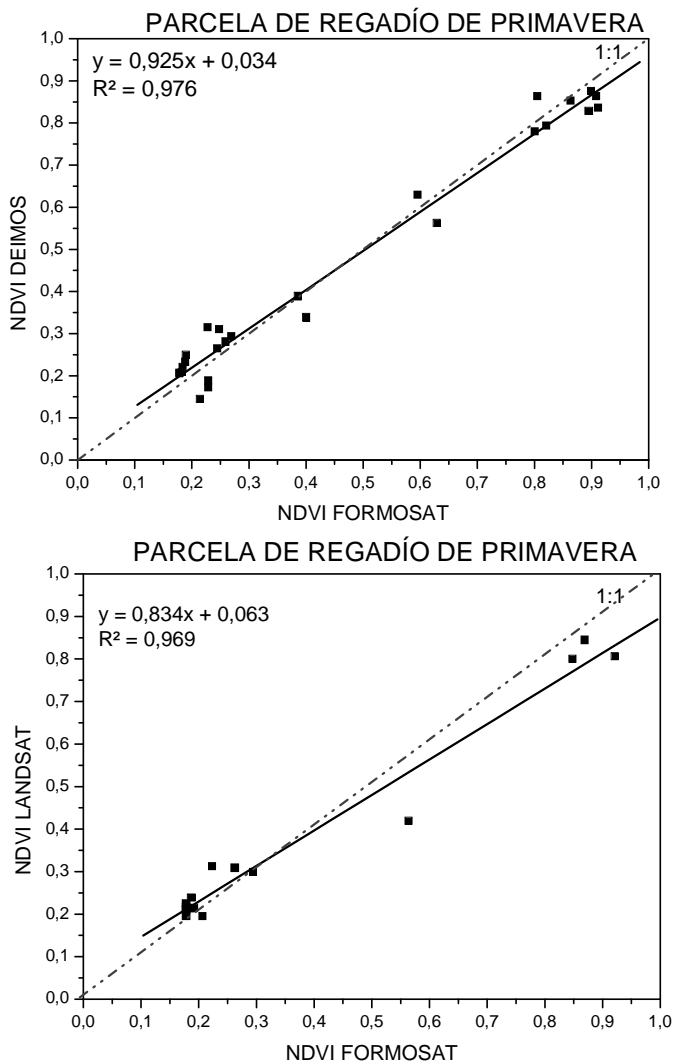


Figura V.8. Comparación del NDVI en una parcela de regadío de primavera, en las fechas coincidentes entre los sensores DEIMOS y FORMOSAT y Landsat y FORMOSAT.

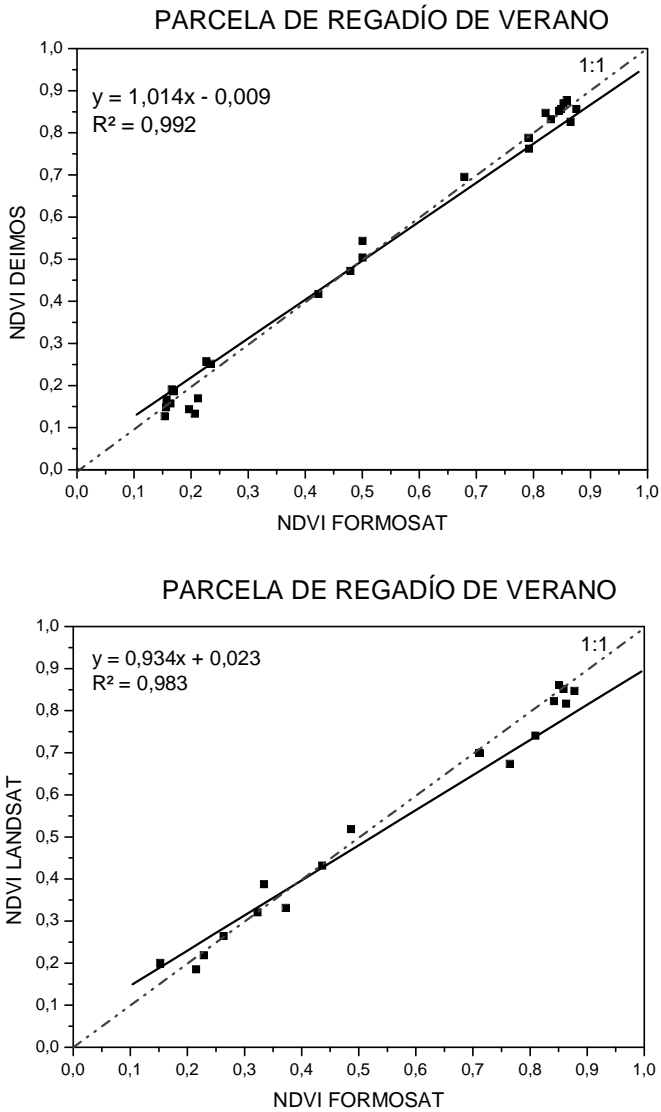


Figura V.9. Comparación del NDVI en una parcela de regadío de verano, en las fechas coincidentes entre los sensores DEIMOS y FORMOSAT y Landsat y FORMOSAT.

V.6 Conclusiones

En este capítulo se ha comenzado con la intercomparación entre los sensores DEIMOS, FORMOSAT y Landsat- 5, con imágenes sincrónicas y podemos concluir los siguientes aspectos:

- Las relaciones entre los distintos pares de sensores muestran un alto grado de estabilidad temporal y un ajuste lineal próximo a la línea 1:1, con similares coeficientes de la ecuación lineal, sobre todo cuando se trata del NDVI. Se observaron ligeras diferencias en las reflectividades BOA, que pueden estar originadas por los diferentes métodos de corrección atmosférica aplicados.
- El efecto de la corrección atmosférica producido por los procedimientos aplicados, puede ser descrito por una transformación lineal de forma más clara en el NDVI. Los coeficientes de la ecuación lineal obtenidos son dependientes de las fechas analizadas.
- La estabilidad temporal en la comparación entre sensores y la disponibilidad de una serie temporal completa de imágenes del año 2010 permite abordar la construcción de una constelación multisensor para la descripción de la cubierta vegetal.

Una vez que se ha puesto de manifiesto que las diferentes observaciones entre sensores son comparables, subsisten diferencias debido a la diferente resolución espacial, ancho de banda espectral de los sensores y localización, hora de adquisición y ángulo de visión. A pesar de todo, la disponibilidad de una serie temporal de imágenes a lo largo del año 2010 de los sensores FORMOSAT, Landsat5-TM y DEIMOS sobre una misma zona, permitió llevar a cabo la construcción de una constelación multisensor basada en dichas imágenes. A partir de estas series de imágenes se obtiene que:

- Es posible construir la evolución temporal de una cubierta vegetal a través del NDVI y accedemos de forma interactiva a dichas imágenes, mediante la herramienta SPIDER, que reúne las características técnicas que han permitido la construcción de esta constelación. Esta se convierte en una poderosa herramienta para el seguimiento del cultivo a lo largo de su crecimiento. La evolución temporal de las diferentes cubiertas

vegetales nos va a permitir la realización de una clasificación supervisada de usos de suelo.

- En la evolución temporal de los índices de vegetación para diferentes cultivos y cubiertas vegetales, encontramos ligeras diferencias entre los sensores, no solo debido a sus diferentes características, sino también a efectos locales no corregidos, a la heterogeneidad de la superficie y a los efectos bidireccionales de la reflectividad. También se han eliminado algunos de los puntos con valores más bajos de NDVI debido a la presencia de nubes en la zona de estudio.

Para evaluar el rendimiento de la constelación de sensores, se ha realizado el seguimiento en un par de parcelas, una de regadío de primavera y otra de verano, a lo largo del tiempo con cada uno de los sensores. Hemos utilizado de base el sensor FORMOSAT del cual se tienen imágenes a lo largo del año 2010, y hemos interpolado los datos para obtener datos a diario. La conclusión es:

- Hay un buen ajuste entre los datos de los sensores DEIMOS y Landsat 5 con los datos diarios obtenidos para FORMOSAT. Aunque hay que ser cautos ya que los datos de FORMOSAT que proceden de la interpolación lineal de una serie de datos, pueden considerarse como imágenes sintéticas y por tanto no pueden considerarse como datos totalmente reales.

CAPÍTULO VI.: CONCLUSIONES. PERSPECTIVAS Y APLICACIONES

VI.1 Conclusiones

La conclusión central es que la utilización de forma operativa de una constelación multisensor es factible para incrementar así la frecuencia de imágenes, lo que introduce una mejora en la dimensión temporal que permite el seguimiento de la cubierta terrestre mediante imágenes de observación de la tierra y evaluar los cambios, en función de los parámetros biofísicos que describen el desarrollo y crecimiento de la vegetación [**Objetivo general**].

Se ha proporcionado una metodología para la comparación de observaciones de diferentes sensores con diferentes bandas, diferente resolución y en varias escalas de observación, a través del NDVI y las reflectividades, el que el procesado básico de correcciones geométricas y radiométricas de imágenes individuales está bien establecido. Dicha metodología permite la intercomparación entre sensores de muy diferente resolución espacial, enlazando observaciones realizadas en el entorno de 10-30 m con aquellas realizadas en el entorno de 250-1000m [**Objetivo parcial 1**].

Nuestra constelación incluye sensores de alta resolución (en la que las unidades de cubierta homogénea son de mayor tamaño que la resolución del

sensor) que permiten el seguimiento de la cubierta, lo que es muy importante en el caso de cultivo. Se han examinado los efectos derivados de la incertidumbre en la corrección geométrica en sensores con diferentes escalas de observación y utilizando diferentes métodos de georreferenciación. El resultado es que la incertidumbre en la georeferenciación “degrada” la resolución espacial del sensor, bien a efectos de comparación con otros sensores, bien para el seguimiento temporal de una cubierta vegetal por un mismo sensor. Por ello, la resolución espacial efectiva de un sensor para el seguimiento temporal de la cubierta sería entre 3x3 y 5x5 píxeles. Para el caso típico de las imágenes Landsat, cuyo resolución espacial nominal es de 30x30m, la resolución “efectiva” para el seguimiento temporal sería alrededor de 100 m x 100 m (1 hectárea). **[Objetivos parciales 2 y 3].**

Hemos aplicado nuestra metodología en zonas homogéneas para separar los efectos de georreferenciación de otras fuentes de error y esto nos ha permitido derivar y mantener la estabilidad temporal de las ecuaciones de traslación entre los diferentes sensores, ya que nuestro principal interés está en la obtención de series temporales de mapas de NDVI procedentes de nuestra constelación. **[Objetivo parciales 4 y 5].**

Se ha prestado especial interés a la descripción de la corrección atmosférica absoluta y relativa, aplicada a las diferentes imágenes de sensores utilizadas. Se ha desarrollado un procedimiento de normalización para intercomparar dichas observaciones. Para contrastar dicho procedimiento, hemos realizado la comparación de las imágenes de NDVI normalizadas con respecto a imágenes de NDVI derivadas de correcciones atmosféricas absolutas, observándose una fuerte correlación lineal para todo el rango de valores de NDVI obtenido mediante ambas metodologías, lo que avala el procedimiento utilizado, al menos en las imágenes analizadas **[Objetivo parcial 6].**

Con el fin de comprobar cómo funciona nuestra metodología en diferentes zonas así como para comparar los diferentes métodos de corrección atmosférica aplicados, se han elegido dos zonas de estudio con diferentes usos de suelo para comprobar el comportamiento de dichos procesos. El análisis que hemos realizado se centra en la comparación entre diferentes sensores, como son Landsat 7- ETM+, Landsat 5- TM y MODIS a cuyas imágenes se les ha aplicado el proceso de corrección atmosférica y la normalización por zonas invariantes y se han evaluado los efectos de aplicar estos métodos:

- Los resultados muestran que la normalización y la corrección atmosférica absoluta coinciden en las zonas agrícolas llanas, mientras que discrepan en las zonas de orografía compleja y vegetación natural. Este diferente comportamiento dependiendo de la zona se traduce en un efecto de sobreestimación del NDVI de la corrección atmosférica frente al proceso de normalización.
- El análisis efectuado señala que las correcciones atmosféricas efectuadas se pueden asemejar a una función lineal. Se ha encontrado que esta función lineal es diferente para cada una de las superficies consideradas, aunque pareciera razonable esperar una misma atmósfera en toda la imagen; así el efecto de sobreestimación de valores que se observa en la zona 2, en la que es predominante la vegetación natural, podría entonces deberse al método utilizado que sería dependiente de las características de la superficie. Este comportamiento podría ser un "artefacto" de los procedimientos de corrección aplicados. Obviamente sería necesario revisar en profundidad el procedimiento y comparar con medidas en situ, lo que no está al alcance de este trabajo.

Una vez que se ha puesto de manifiesto que las diferentes observaciones entre sensores son comparables, es posible construir la evolución temporal de una cubierta vegetal a través del NDVI y accedemos de forma interactiva a dichas imágenes, mediante la herramienta SPIDER, que reúne las características técnicas que han permitido la construcción de esta constelación. Esta se convierte en una poderosa herramienta para el seguimiento del cultivo a lo largo de su crecimiento. La completa caracterización del patrón temporal y su correspondencia con un cultivo o grupo de cultivos permite utilizar el patrón temporal como criterio básico de clasificación, para realizar así el inventario de cultivos **[Objetivo parcial 7]**

Para evaluar el rendimiento de nuestra constelación de sensores, hemos realizado el seguimiento en un par de parcelas, una de regadío de primavera y otra de verano, a lo largo del tiempo con cada uno de los sensores, utilizando de base el sensor FORMOSAT del cual tenemos más imágenes a lo largo del año 2010. La conclusión ha sido que hay un buen ajuste entre los datos de los sensores DEIMOS y Landsat 5 con los datos diarios simulados para FORMOSAT.

VI.2 Perspectivas y aplicaciones

Disponer de densas secuencias temporales de imágenes multiespectrales de alta resolución espacial, entre 5 y 30 m, en casi tiempo real es un proyecto largamente acariciado tanto por la comunidad científica como por usuarios del sistema de observación de la Tierra. La disponibilidad de estas series de imágenes permitiría el seguimiento de la superficie terrestre y especialmente de la cubierta vegetal que sobre ella se desarrolla, con un nivel de detalle espacio-temporal que solo de esta manera es posible alcanzar.

La obtención de estas series no puede acometerse con un solo sensor. Es necesario contar con una constelación multisensor. Así el crecimiento de los cultivos, los cambios en la vegetación de los ecosistemas, así como otros cambios en la superficie terrestre podrían ser registrados con fidelidad en el espacio y en el tiempo, lo que abre paso a multitud de aplicaciones en agronomía y en el seguimiento ambiental, pues no solamente se capturaría el estado de la superficie, sino su dinámica.

Esta Tesis supone pues una contribución para que aplicaciones que por ahora suelen ser mencionadas solamente como potencial de la observación de la Tierra, puedan pasar a la fase operativa. La contribución de la Tesis se ha centrado principalmente en la metodología para la obtención de secuencias temporales del parámetro NDVI. Se ha utilizado el NDVI por su importancia para derivar desde él parámetros biofísicos relevantes de la cubierta vegetal.

De esta forma el conocimiento desarrollado en las últimas décadas sobre las relaciones entre parámetros biofísicos y NDVI se puede incorporar en las aplicaciones que requieren de secuencias temporales. Este conocimiento, que necesariamente ha de ser mejorado con trabajos de investigación, ya permite asignar a estas relaciones características de fiabilidad, reproducibilidad y robustez suficientes para ser incorporadas en lo que cabría denominar Ingeniería de la observación de la Tierra aplicada a la agricultura y a los ecosistemas. También empezaría a cumplir los requisitos para su utilización rutinaria por la administración y como prueba para la resolución de conflictos tanto en el ámbito judicial como extrajudicial.

Esta Tesis se ha ido construyendo a la vez que se han desarrollado aplicaciones concretas, por lo que ha permitido avanzar en estas aplicaciones y a la vez se ha enriquecido con ellas. Así, los proyectos europeos DEMETER,

PLEIADeS y SIRIUS han requerido de estas series temporales para la descripción del coeficiente de cultivo basal desde la secuencia de imágenes. La integración de dicho coeficiente en un modelo de balance de agua ampliamente utilizado como es FAO56 ha abierto al cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y de las necesidades hídricas de riego a escala de parcela, lo que se ha llevado a cabo en los proyectos del Plan Nacional de Investigación MORE y EBHE.

Un mejor seguimiento de la cubierta vegetal y su fenología están en la base de muchas aplicaciones agronómicas. En concreto la utilización de una mejor descripción del patrón temporal de la cubierta vegetal desde la secuencia de imágenes va a facilitar la identificación de las diferentes cubiertas vegetales, alcanzando gran precisión en la realización de la clasificación supervisada (Martínez Beltrán, 1999; Martínez Beltrán and Calera Belmonte, 2001; Martínez Beltrán et al, 2003; Martínez Beltrán et al, 2009). Esta manera de operar ha venido proporcionando, en mejora progresiva, desde hace casi 20 años la identificación anual de las superficies de regadío en el acuífero Mancha Oriental, en la cuenca alta del Júcar. Dicha clasificación es una de las piedras angulares sobre las que descansa la gestión del agua en este acuífero, ya que ha permitido la asignación de derechos de forma eficaz, y en la actualidad facilita como ninguna otra herramienta el seguimiento del Plan Anual de Explotación. Secuencias temporales multisensor que utilizan metodología descrita en esta Tesis son construidas de forma rutinaria en los últimos años en el ámbito de la Mancha Oriental, y pueden ser visualizadas a través del sistema web GIS SPIDER (<http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/>)

En la actualidad un importante conjunto de sensores pueden configurar la constelación multisensor. La resolución espacial necesaria puede ser suministrada por sensores actualmente en órbita como FORMOSAT-2 (8 m), DEIMOS-UKDMC2 y DEIMOS-DMC1 (20m), Landsat 5 Thematic Mapper (TM) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (30 m), SPOT VEGETATION (10 m), IRS 1C/D LISS-III (LISS) (23,5 m), RapidEye (5m), ASTER (Turner et al., 2007). Satélites de muy alta resolución espacial como son QuickBird, Ikonos, Spin 2, Worldview- 1 y GeoEye- 1, cuya resolución espacial se encuentra en el orden del metro complementan la pléyade de sensores.

Como ya se ha comentado anteriormente, el 11 de Febrero de 2013 fue puesto en órbita el satélite Landsat 8 (30 m), por parte de NASA, que entró en operación rutinaria en Mayo de 2013. El lanzamiento, puesta en operación y, lo más importante, la distribución gratuita de las imágenes al cargo del USGS,

podieran ser calificadas como el nacimiento de una nueva era en la observación de la Tierra. Esta denominación se justifica, además de por la calidad de los sensores a bordo tanto en el espectro solar como en los canales térmicos, por la puesta a disposición de los usuarios, de forma libre y gratuita, de las imágenes adquiridas lo largo de la órbita en el mismo día de su adquisición, gracias a los avances realizados en el segmento tierra. Esta política de datos del Gobierno de los Estados Unidos, que se ha extendido a todo el archivo histórico de la serie Landsat, supone un giro copernicano en cuanto a la difusión y utilización de imágenes de satélite, y probablemente arrastre a otras agencias espaciales gubernamentales, a una política similar, como ya ha anunciado la ESA (European Space Agency). Las imágenes ortorectificadas de los sensores operados por NASA, entre las que se encuentran L8 y Landsat7-ETM+, tanto aquellas de nueva adquisición como todo el archivo histórico pueden descargarse libremente desde el servidor GLOVIS . Esta nueva forma de operar puede desplazar el interés económico no tanto a las imágenes como ha venido sucediendo hasta ahora, sino más bien al valor añadido que la información contenida en estas imágenes aporte, que seguramente irá ligada a la descripción de los cambios de la superficie terrestre y por tanto a las secuencias capaces de describirlos.

En 40 años de continua cobertura, la serie de satélites Landsat ha sido una referencia fundamental que han permitido llevar a cabo temas científicos relacionados con el uso y observación de la Tierra de manera y con los recursos naturales. Ningún otro programa de satélites está cerca de tener un archivo de imágenes similar, tanto en lo que re refiere a cobertura como en continuidad, al de Landsat. Los próximos esfuerzos se destinarán al desarrollo de los dos satélites siguientes, Landsat 9 y 10 (Loveland and Dwyer, 2012).

Tanto o más de ambiciosa es la propuesta de lanzamiento de Sentinel- 2 que tiene por objetivo colocar una red europea de larga duración para la monitorización y el análisis de datos relevantes para el medioambiente. El par de satélites de Sentinel- 2, proporcionará de forma rutinaria imágenes ópticas con 10 m de resolución espacial y con un ancho de surco de 300 km de alta resolución.

Sentinel- 2 proporciona continuidad a servicios basados en observaciones ópticas multi- espectrales de alta resolución sobre la superficie terrestre. Los objetivos de la misión de Sentinel son: (1) Proveer de adquisiciones globales sistemáticas con imágenes multi-spectral de alta resolución con una alta frecuencia de revisita, (2) Proporcionar continuidad a las imágenes

multiespectrales proporcionadas por la serie de satélites SPOT y (3) Prever observaciones para la siguiente generación de productos operacionales, por ejemplo mapas de usos de suelo, mapas de la detección de cambio de la tierra, y variables geofísicas (Drusch et al, 2012).

La misión Sentinel-2 ofrecerá una combinación sin precedente de la cobertura global sistemática de la superficie terrestre, una revisita de cinco días en el ecuador bajo mismas condiciones de observación, alta resolución espacial ya que va a permitir resolver parcelas de alrededor de 0,1 ha (3x3píxeles) y un amplio campo de visión para observaciones multispectrales con 13 bandas en el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del espectro electromagnético.

Otros muchos satélites, de entre los cuales ya se ha mencionado el español INGENIO, que tiene un diseño similar a SPOT 5, se van a unir en los próximos años a la constelación disponible en el rango de los 5-30 m.

Por todo ello es esperable que series temporales de imágenes en alta resolución se incorporen de forma rutinaria a aplicaciones que requieren la descripción espacio-temporal detallada de la superficie terrestre y de sus cambios; por tanto muchos esfuerzos científicos puede que se dirijan a garantizar la homogeneidad y fiabilidad de la serie, a lo que esta Tesis pretende aportar su contribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorós- López, J., Gómez- Chova, L., Izquierdo, E., Camps- Valls, G., Calpe, J. and Guanter, L., 2009, Cadena de procesado de imágenes Landsat para la generación de mosaicos a escala regional. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud*, 23- 26 de Septiembre, Salomón Montesinos y Lara Fernández (Ed).

Belmonte, M., Arellano, I., Campos, I., Martínez-Beltrán C. y Calera, A., 2011, Constelación multisensor para el seguimiento y clasificación de cultivos en el área de estudio de la Mancha Oriental XIV. *Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Mieres del Camino (Principado de Asturias)*, 21 al 23 de septiembre de 2011, Carmen Recondo González Enrique Pendás Molina (Ed).

Bian, L. and Butler, R., 1999, Comparing effects of aggregation methods on statistical and spatial properties of simulated spatial data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **65**, 73- 84.

Calera, A., 2000, Seguimiento mediante Teledetección de la cubierta vegetal de los cultivos de secano y su relación con variables climáticas en Castilla-La Mancha. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.

Calera, A., Jochum, A.M., Cuesta, A., Montoro, A. and López Fuster, P., 2005, Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrig. Drain. Systems*, **19**, pp. 337-353.

Calera, A., Martínez, C. and González- Piqueras, J., 2001, Integration of information from multiscale satellites, Dais and Landsat. Applying a lineal model to the NDVI mean values in La Mancha (Spain). In *Proceedings of the Final Results Workshop of DAISEX Digital Airborne Spectrometer EXperiment*, (ESA publications division), pp. 241-248.

Calera, A., Odi, M, Martínez- Beltrán, C, Campos, I, González- Piqueras, J., 2010, Satellite constellation for crop monitoring: Formosat-2; Deimos-DMC, Landsat 5-TM and Landsat 7-ETM+. RAQRS 2010. Valencia.

Calera, A., Quintanilla, A., Castaño, S., Belmonte, M., Arellano, I., Campos, I., Escudero, R., Checa, M.J., García, M.A., 2010b, Evolución de superficies en regadío mediante teledetección en el ámbito del acuífero Mancha Oriental. Informe ERMOT 2010. Sección de Teledetección y SIG. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla-La Mancha.

Calera, A., Quintanilla, A., Castaño, S., Belmonte, M., Arellano, I., Campos, I. and Martínez, N., 2011, Evolución de superficies en regadío mediante teledetección en el ámbito del acuífero Mancha Oriental. Informe ERMOT 2011. Sección de Teledetección y SIG. Universidad de Castilla-La Mancha.

Campos, I., Odi, M., Belmonte, M., Martínez- Beltrán, C. And Calera, C., 2011, Obtención de series multitemporales y multisensor de índices de vegetación mediante un proceso de normalización absoluta. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mieres del Camino (Principado de Asturias)*, 21- 23 de septiembre, Carmen Recondo González y Enrique Pendás Molina (Ed).

Canty, M. J., Nielsen, A. A., & Schmidt, M., 2004, Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, **91**, 441–451.

Caselles, V. and Garcia, M.J.L., 1989, An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multi-temporal studies. *International Journal of Remote Sensing*, **10** (6), 1127–1134.

- Chander, CH. and Markham, B., 2003, Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 2674- 2677.
- Chander, G., Markham, B. L. and Helder, D. L., 2009, Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 893–903.
- Chander, G., Xiong, X., Choi, T. and Angal, A., 2010, Monitoring on-orbit calibration stability of the Terra MODIS and Landsat 7- ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 925–939.
- Chavez, P.S., 1988, An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multi-spectral data. *Remote Sensing of the Environment*, **24**, 458–479.
- Chavez, P.S., 1996, Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **62** (9), 1025-1036.
- Chen, X., Vierling, L. and Deering, D., 2005, A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment*, **98**, 63-79.
- Chuvieco, E., y Hantson, S., 2010, Documento técnico de los algoritmos a aplicar sobre las imágenes de satélite de media resolución. *Plan Nacional de Teledetección de Media resolución* (Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares).
- Cosnefroy, H., Leroy, M., & Briottet, X., 1996, Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors. *Remote Sensing of Environment*, **58**, 101–114.
- D'urso, G., Vuolo, F. and Marotta, F., 2006, Success Stories: Analysis and evaluation of the Italian Case-Study of DEMETER in the Destra Sele Plain. In *Proceedings International Conference on Earth Observation for vegetation monitoring and water management*, 9-11 November 2005, Napoli, (American Institute of Physics), pp. 3- 13.

Referencias bibliográficas

Dave, J.V. and Gazdag, J., 1970, A modified Fourier transform method for multiple scattering calculations in a plane parallel Mie atmosphere. *Applied Optics*, **9**, 1457-1466.

De Cola, L., 1997, Multiresolution covariation among Landsat and AVHRR Vegetation Indices. In *Scale in Remote Sensing and GIS*, D. A. Quattrocci, and M.F., Goodchild (Ed.), (CRC Lewis Publications), pp. 73-92.

Demeter, 2002, (DEMONstration of Earth observation TEchnologies in Routine irrigation advisory services) is a project supported by the European Commission's Energy, Environment and Sustainable Development Programme (EVG1-CT-2002-00078). **URL:** <http://www.demeter-ec.net>

Deuze, J. L., Herman, M., & Santer, R., 1989, Fourier series expansion of the transfer equation in the atmosphere-ocean system. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **41**, 483-494.

Dingirard, M., & Slater, P. N., 1999, Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. *Remote Sensing of Environment*, **68**, 194-205.

Doorenbos J., y Pruitt W.O, 1977, Las necesidades de agua de los cultivos. Estudios FAO: Riego y Drenaje, 24-.

Drusch, M., Del Bello U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., and Bargellini, P., 2012, Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, **120**, 25-36.

Du, Y., Teillet, P.M. and Cihlar, J., 2002, Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, **82**, 123-134.

Furby, S. L., & Campbell, N. A. , 2001, Calibrating images from different dates to like-value' digital counts. *Remote Sensing of Environment*, **77**, 186-196.

Gallo, K., Ji, L., Reed, B., Eidenshink, J. and Dwyer, J., 2005, Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, **99**, 221- 231.

Gitelson, A.A. and Kaufman, Y.J., 1998, MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series-spectral considerations. *Remote Sensing of Environment*, **66**, 343-350.

Guanter, L., Alonso L. and Moreno, J., 2005, A method for the surface reflectance retrieval from PROBA/CHRIS data over land: Application to ESA SPARC Campaigns. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**, 2909-2917.

Guanter, L., Gómez-Chova, L., and Moreno, J., 2008, Coupled retrieval of aerosol optical thickness, columnar water vapour and surface reflectance maps from ENVISAT/MERIS data over land. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 2898–2913.

Guanter, L., González, M.C. and Moreno, J., 2004, Retrieval of Land Surface Reflectance and Albedo from MERIS Data. *Proceedings of the ENVISAT Symposium*, September 2004, Salzburg.

Guanter, L., González, M.C. and Moreno, J., 2007, A method for the atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over land targets. *International Journal of Remote Sensing*, **28**, 709–728.

Guyot, G. and Gu, X.F., 1994, Effect of radiometric corrections on NDVI-determined from SPOT HRV and Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, **35**, 169- 180.

Hadjimitsis, D., Clayton, C. and Retalis, A., 2009, The use of selected pseudo-invariant targets for the application of atmospheric correction in multi-temporal studies using satellite remotely sensed imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **11**, 192- 200.

Hadjimitsis, D.G., Clayton, C.R.I. and Hope, V.S., 2004, An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, **25**, 3651–3674.

Hagolle, O., Dedieu, G., Mougenot, B., Debaecker, V., Duchemin, B., & Meygret, A., 2008, Correction of aerosol effects on multi-temporal images acquired with constant viewing angles: application to Formosat-2 images. *Remote Sensing of Environment*, **122**, 1689-1701.

Referencias bibliográficas

Hansen, M. C., and Loveland, T., 2012, A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, **122**, 66- 74.

Huete, A., Yoshioka, H., Miura, T., Kim, H.J., and Gao, X., 2002, Inter-sensor calibration of vegetation indices for monitoring and continuity studies of ecosystem variability. In *Recent advances in quantitative remote sensing*, J.A. Sobrino (Ed.), (Valencia: Publicacions de la Universitat de València), pp: 21- 30.

Irons, J. R., Dwyer, J.L. and Barsi, J.A., 2012, The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*, **122**, 11- 21.

Jackson, R.D., 1984, Remote Sensing of Vegetation Characteristics for Farm Management. In *Sixth, Vol 475, in the SPIE Critical Reviews of Technology Series: Remote Sensing by the Society of Photo- Optical Instrumentation Engineers*, (SPIE, Bellingham, WA, USA), pp. 81- 96.

Justice, C.O., Markham, B.L., Townshen, J.R.G., and Kennard, R.L., 1989, Spatial degradation of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 1539-1561.

Kovalskyy, V., and Roy, D.P., 2013, The global availability of Landsat 5 TM and Landsat 7- ETM+ land surface observations and implications for global 30 m Landsat data production generation. *Remote Sensing of Environment*, **130**, 280–293.

Liou, K.N, 2002, An Introduction to Atmospheric Radiation, 2nd Ed., (Academic Press).

Loveland, T.R. and Dwyer, J.L, 2012, Landsat: Building a strong future. *Remote Sensing of Environment*, **122**, 22- 29.

Markham, B.L. and Helder, D.L., 2012, Forty- year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review. *Remote Sensing of Environment*, **122**, 30-40.

Martín de Santa Olalla F., de Juan Valero J.A., 1992, El cálculo y estimación de la evapotranspiración. *Agronomía del riego*. Ediciones Mundi- Prensa, Madrid pp-373- 446.

Martínez Beltrán, 1999, Identificación y estimación de superficies en cultivos herbáceos de regadío mediante imágenes Landsat TM en la Mancha Oriental. Trabajo de Investigación. Universidad de Valencia.

Martínez Beltrán, C. and Calera Belmonte, A., 2001, Irrigated crop area estimation using Landsat TM in La Mancha, Spain. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **67**, 1177-1184.

Martínez Beltrán, C., Calera Belmonte, A. and Jochum A., 2003, Inter-satellite cross-calibration: Integration of reflectance and NDVI from different satellites by means of a linear model. In *Proceedings of SPIE, Vol 5232, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology*, (SPIE, Bellingham, WA, USA), pp. 128- 139.

Martínez-Beltrán, C., Jochum, M. A. Osann, Calera A. and Meliá J., 2009, Multisensor comparison of NDVI for a semi-arid environment in Spain. *International Journal of Remote Sensing*, **30**:5, 1355- 1384.

Miura, T., Huete, A. and Yoshioka, H., 2006, An empirical investigation of cross- sensor relationships of NDVI and red/near- infrared reflectance using EO- 1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, **100**, 223- 236.

Moran, M. S., Inoue, Y., and Barnes, E. M., 1997, Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management. *Remote Sensing of Environment*, **61**, 319-346.

Moreno- Rivera, J.M., Osann, A.M., Calera, A., and García, J., 2008, SPIDER - An Open GIS application use case for irrigation water management.

Moreno, J.F., Cabeza, I., Calera, A., Jochum, A. M., Marti, J.M. and Menenti, M., 2002, Land Irrigation Support Service (LISSE), Report, ESA contract 14236/00/NL/DC. 176. **URL:** <http://io.uv.es/projects/lisse/>

NASA, 2003, Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7- ETM+ Data following Scan Line Corrector Malfunction, *Compiled and summarized by the staff of the U.S. Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, SD 57198*. **URL:** <http://landsat.usgs.gov/documents/>

Osann Jochum, A.M., Calera, A., and Co-Authors, 2006, Operational Space-assisted Irrigation Advisory Services: Overview and lessons learned from the

Referencias bibliográficas

DEMETER project. In *Proceedings International Conference on Earth Observation for vegetation monitoring and water management*, 9-11 November 2005, Napoli (American Institute of Physics), pp. 3- 13.

Press, W. H., Flannery, B.P., Teukolosky, S.A. and Vetterling, W.T., 1986, *Numerical Recipes in Fortran*, (Cambridge University Press).

Richter, R., 1997, Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 1099-1111.

Röder, A., Kuemmerle, T., and Hill, J, 2005, Extension of retrospective datasets using multiple sensors. An approach to radiometric intercalibration of Landsat TM and MSS data. *Remote Sensing of Environment*, **95**, 195- 210.

Rouse, J.W, Haas, R.H, Shell J.A, Deering, D.W, Harlan, J.C, 1974, Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III. (Greenbelt, MD, NASA/GSFC), pp. 371.

Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E. et al, 2014, Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, **145**, 154- 172.

Running, S.W., Justice, C.O., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, Y.J., Strahler, A.H., Huete, A., Muller, J.P., Vanderbilt, V., Wan, Z.M., Teillet, P. and Carnegie, D., 1994, Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International journal of remote sensing*, **15**, 3587-3620.

Schroeder, T.A., Cohen, W.B., Song, C., Canty, M.J. and Yang, Z., 2006, Radiometric correction of multitemporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, **103**, 16-26.

Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., Sonnenschein, R. and J. Hill, J., 2010, Dryland observation at local and regional scale- Comparison of Landsat TM/ETM+ and NOAA AVHRR time series. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 2111–2125.

- Steven, M., Malthus T.J., Baret, F., Xu, H., and Chopping, M.J., 2003, Intercalibration of vegetation indices from different sensor system. *Remote Sensing of Environment*, **88**, 412-422.
- Takeuchi, W. and Yasuoka, Y., 2004, Development of normalized vegetation, soil and water indices derived from satellite remote sensing data. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, **48**, 7- 19.
- Tanré, D., Herman, M., & Deschamps, P. Y. ,1981, Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. *Applied Optics*, **20**, 3676–3684.
- Teillet, P.M., Barker, J.L., Markham, B.L., Irish, R.R., Fedosejevs, G. and Storey, J.C., 2001, Radiometric Cross- Calibration of the Landsat- 7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. *Remote Sensing of Environment*, **78**, 39-54.
- Teillet, P.M., Markham, B.L. and Irish, R.R., 2006, Landsat cross-calibration based on near simultaneous imaging of common ground targets. *Remote Sensing of Environment*, **102**, 264-270.
- Thuillier, G., Herse, M., Labs, S., Foujols, T., Peetermans, W., Gillotay, D., Simon, P. C., and Mandel, H., 2003, The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by SOLSPEC Spectrometer from the ATLAS 123 and EURECA missions. *Solar Physics*, **214**(1), 1–22.
- Turner, B. L., II, Lambin, E. F. and Reenberg, A., 2007, The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *PNAS*, **104**, 20666–20671.
- Van Leeuwen, W. J.D., Orr, B.J., Marsh, S.E. and Herrmann, S.M., 2006, Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, **100**, 67-81.
- Vermote, E.F. and Vermeulen, A., 1999, Atmospheric correction algorithm: Spectral reflectances (MOD09), Version 4.0. University of Maryland, Dept of Geography NASA contract NAS5-96062.

Referencias bibliográficas

Vermote, E.F., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M. and Morcrette, J.J, 1997, Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-35, 675–686.

Vries, de C., Danaher, T., Denham, R., Scarth, P. & Phinn, S.,2007, An operational radiometric calibration procedure for the Landsat sensors based on pseudo- invariant targets sites. *Remote Sensing of Environment*, **107**, 414- 429.

Watanabe, comunicación personal acerca de las diferencias en las características radiométricas de los sensores L1A y L1B de ASTER.

Wulder., M.A., White, J.C., Goward, S.N., Masek, J.G., Irons, J.R., Herold, M., Cohen, W.B., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., 2008, Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 955–969.