

Desarrollo de productos avanzados para la misión SEOSAT/Ingenio

Sabater, N.¹, Ruiz-Verdú, A.¹, Delegido, J.*¹, Fernández-Beltrán, R.², Latorre-Carmona, P.², Pla, F.², González-Audícana, M.³, Álvarez-Mozos, J.³, Sola, I.³, Villa, G.⁴, Tejeiro, J. A.⁴, de Miguel, E.⁵, Jiménez, M.⁵, Molina, S.⁶, Moreno, J.¹

¹ Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia, España.

² Instituto de Nueva Tecnologías de la Imagen, Universidad Jaume I, Campus Riu Sec s/n, 12071 Castellón de la Plana, España.

³ Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía s/n, 31006, Pamplona, Navarra, España.

⁴ Unidad de Observación del Territorio, Instituto Geográfico Nacional, General Ibáñez de Ibero, 3, Madrid, España.

⁵ Área de Sistemas de Teledetección. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), España.

⁶ Departamento de Fotogrametría y Topografía. Grupo Tragsa. SEPI, España.

Resumen: SEOSAT/Ingenio es la futura misión española de observación de la Tierra en el óptico en alta resolución espacial. Mientras que los productos de imagen a Nivel 1, radiancias geo-referenciadas a nivel de sensor, se encuentran en una fase avanzada de desarrollo existiendo para ello un contrato industrial, los productos de Nivel 2 deben ser desarrollados por los propios usuarios. Este hecho limita el uso de las imágenes a la comunidad científica, restringiendo sus posibles aplicaciones fuera de ésta. Así pues, bajo el marco de un proyecto coordinado y motivados por ofrecer productos de Ingenio/SEOSAT de Nivel 2 a disposición de cualquier usuario, se origina y desarrolla este trabajo. En este artículo se presentan los diferentes procesos desarrollados para la elaboración de productos a Nivel 2, desde reflectividades en superficie a la resolución nominal del sensor hasta imágenes con información espacial realzada y la posibilidad de crear mosaicos espaciales y compuestos temporales. Por una parte, en el caso de los productos de reflectividad en superficie se propone una técnica de corrección atmosférica basada en el uso de la información espacial, previo enmascaramiento de las nubes y una exhaustiva corrección de sombras morfológicas y/o topográficas. Por otra parte, para el realce de la información espacial, han sido evaluados diferentes métodos basados en la fusión de bandas multispectrales con una banda pancromática así como la aplicación de técnicas llamadas de "Super-resolución". Finalmente, se proporcionan las herramientas necesarias para la realización de mosaicos tanto espaciales como temporales para todo tipo de usuarios interesados en la explotación de las imágenes.

Palabras clave: SEOSAT/Ingenio, productos Nivel 2, realce pancromático, Súper-resolución, corrección atmosférica, generación de mosaicos, compuesto multitemporal, integración.

Development of advanced products for the SEOSAT/Ingenio mission

Abstract: SEOSAT/Ingenio is the future Spanish Earth Observation high spatial resolution mission in the optical domain. While Level 1 products, at-sensor geo-referenced radiances, are in an advanced phase of development under the framework of an industrial contractor, Level 2 products must be developed by the users. This fact limits the use of the satellite images only to the scientific community, restricting their use in other applications. The need to alleviate this limitation motivated this work, developed under the framework of a coordinate project, which aimed at offering a

* Autor para la correspondencia: Jesus.Delegido@uv.es

list of Level2 products to the Ingenio/SEOSAT user community. In this paper, we present the different methodologies developed to produce the proposed Level2 products, from surface reflectance at nominal sensor spatial resolution to images with higher spatial resolution or the possibility to create spatial and temporal mosaics. On the one side, for the surface reflectance product, we proposed an atmospheric correction algorithm based on using the spatial information, linked to a cloud screening algorithm and including morphological and topographic shadow corrections. On the other side, to enhance the image spatial resolution, we applied different fusion techniques using the multispectral and the panchromatic band, as well as some of the so-called "super-resolution" techniques. Finally, we provided different tools to develop spatial mosaics and temporal composites, directed to users interested on the exploitation of the Ingenio/SEOSAT images.

Key words: SEOSAT/Ingenio, Level 2 products, pan-sharpening, super-resolution, atmospheric correction, mosaicking, temporal composites, integration.

1. Introducción

Las misiones actuales de observación de la Tierra en el óptico de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Norteamericana (NASA), que proporcionan imágenes de alta calidad y de forma gratuita para todos los usuarios, suponen un importante avance en cuanto a la cantidad y calidad de las aplicaciones de la teledetección. Las imágenes MODIS y Landsat-8 de la NASA, con 500 m y 30 m de resolución, junto a las Sentinel-2 y Sentinel-3 de la ESA, con 10 m y 300 m de resolución, abarcan un amplio abanico de aplicaciones, impensables hace unos pocos años. Sin embargo, falta por cubrir el segmento de la alta resolución espacial que hasta ahora no está disponible de forma gratuita para todos los usuarios.

El satélite SEOSAT (*Spanish Earth Observation Satellite*)/Ingenio es una misión destinada a generar imágenes ópticas multiespectrales de la superficie terrestre con alta resolución espacial (2,5 y 10 m) con usos en cartografía, urbanismo, agricultura, calidad de aguas, evaluación de riesgos, etc. (Marini *et al.*, 2014). Su lanzamiento está previsto para 2018, y existe un contrato industrial para la generación de productos imagen calibrados y geo-referenciados que serán puestos a disposición de los usuarios. Sin embargo, en este contrato no se incluye la elaboración de productos avanzados o Nivel 2 (L2) que faciliten el uso de las imágenes y extracción de la información de forma rápida y sencilla, sin necesidad de ser especialistas o investigadores en teledetección. Estos productos pueden contribuir de manera significativa al éxito de la misión al llegar a una mayor cantidad de usuarios y aplicaciones. Con el objetivo de desarrollar estos productos Nivel 2 y poner los algoritmos y

procedimientos correspondientes a disposición de toda la comunidad, diferentes grupos españoles de investigación en teledetección están desarrollando un proyecto coordinado subvencionado por el Plan Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica, cuyos primeros resultados se muestran en este trabajo. Los productos elegidos para su desarrollo en este proyecto y presentados en este artículo son la fusión de imágenes pancromáticas (PAN) con multiespectrales (MS) o "pan-sharpening" (Sección 3), método de Súper-resolución optimizado a Ingenio (Sección 4), producto de reflectividad con máscara de nubes y corrección de sombras (Sección 5), corrección topográfica (Sección 6) y generación de mosaicos espaciales y compuestos temporales (Sección 7).

2. Características de la misión Ingenio

SEOSAT/Ingenio forma parte del Sistema Español de Observación de la Tierra por Satélite, y está siendo construido por la filial española de Airbus Defence & Space (AD&S), junto con un consorcio que incluye numerosas empresas españolas del sector espacial, bajo responsabilidad del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) (www.cdti.es).

Su zona de cobertura incluirá todas las superficies en tierra (zonas continentales e islas principales) desde los 83° N a los 56° S, con preferencia para la zona comprendida por España, países europeos y del norte de África, así como países de América del Sur. La órbita será heliosíncrona, con una altura promedio de 670 km sobre la superficie, y cruzando el Ecuador en el nodo descendente a las 10:30 UTC. Su capacidad de adquisición de imágenes será de 2.500.000 km² por día, como

promedio mensual y asumiendo disponibilidad de las estaciones de descarga de datos en tierra y un cierto nivel de compresión a bordo de los datos, dado que la memoria a bordo es de 512 Gb. Las imágenes se adquirirán nominalmente en nadir con una tolerancia de ± 5 grados, aunque en casos especiales como emergencias el sistema podrá apuntar fuera de nadir y tomar imágenes en el rango ± 35 grados. Ingenio utilizará dos cámaras gemelas funcionando en paralelo en la dirección transversal al avance del satélite; en el plano focal de cada una de ellas se disponen a su vez dos pares de detectores CCD (uno para las cuatro bandas multispectrales, y otro con más elementos para la pancromática); cada par cubrirá la mitad del campo de visión de una cámara, con lo que finalmente se conseguirá un ancho de barrido de 55 km. Obtendrá imágenes con 5 bandas: PAN entre 521 y 679 nm, con 2,5 m de resolución, Azul (410-486 nm), Verde (520-592 nm), Rojo (604-679 nm) y NIR (784-893 nm), estas cuatro con píxel de 10 m. La adquisición de la información en las diferentes bandas se realizará mediante separación espectral en campo y utilización de filtros específicos para cada banda, lo que implica que el correregistro entre bandas dependerá de la exactitud en la georreferenciación y de eventuales post-procesos.

En paralelo a la construcción del satélite se está desarrollando también el procesador de datos del segmento terreno. Los productos de Nivel 1 incluyen:

Productos de Nivel 1a (L1a), que contendrán datos brutos descomprimidos en cuentas digitales de las cuatro subescenas obtenidas sobre el terreno para los 55 km \times 55 km que definen una escena tipo, en los canales PAN y MS.

Productos de Nivel 1b (L1b), que contendrán los datos asociados a las magnitudes físicas observables, es decir, radiancias espectrales ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) en el techo de la atmósfera. Son, por tanto, productos radiométricamente calibrados, espectral y geoméricamente caracterizados. Los productos L1b básicos, o L1b1, al igual que los L1a, se procesarán por separado para cada detector, por lo que habrá 4 subescenas L1b1 por cada escena Ingenio. Posteriormente, se generará un producto L1b2 con el remuestreo de la información de las cuatro subescenas L1b1 sobre una malla *perfect sensor*, similar a la utilizada en

Pleiades (de Lussy *et al.*, 2005). Este producto L1b2 es el relevante para la generación de mosaicos que se discute más adelante.

Productos de Nivel 1c (L1c), que contendrán datos de radiancias espectrales en el techo de la atmósfera, calibrados y ortorectificados en proyección UTM mediante el uso de un modelo digital de elevación del terreno (MDT) y remuestreo de las 4 subescenas L1b1 en una única imagen en malla cartográfica con remuestreo *B-cubic spline*.

Aunque estos productos Nivel 1 cubrirán claramente los requisitos básicos de los usuarios avanzados, para otros usuarios tales como la propia administración o aquellos usuarios que se ocupan de aplicaciones y que no pueden ellos mismos llevar a cabo el procesado necesario, resulta imprescindible desarrollar unos productos avanzados (Nivel 2 y posiblemente algunos de Nivel 3) con el fin de que pueda hacerse realidad todo el potencial de aplicaciones de Ingenio/SEOSAT, lo que constituye el objetivo de este trabajo.

3. Pan-sharpening

La fusión de imágenes PAN y MS es el proceso por el cual se consigue mayor resolución en las bandas MS a partir de la información de la banda PAN. Este proceso es de especial interés para Ingenio debido a su alta resolución PAN (2,5 m). En las últimas dos décadas se han propuesto multitud de métodos de *pan-sharpening*, siendo los desarrollados en el marco del análisis multirresolución (*Multi-resolution Analysis* o MRA) y basados en transformadas *wavelet*, o más recientemente, en transformadas multidireccionales como las *Curvelet*, *Contourlet*, *Shearlet* o *Framelet* (Do y Vetterli, 2005) los que permiten obtener imágenes fusionadas de mayor calidad. En este trabajo, se han aplicado los 19 métodos de *pan-sharpening* recogidos en Vivone *et al.* (2015), sobre imágenes SEOSAT simuladas a partir de imágenes CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) adquiridas el 7 de septiembre de 2011 sobre la ciudad de Valencia, usando las funciones filtro de SEOSAT. En la Figura 1 se muestran las imágenes de partida para este análisis. Cabe señalar que en aquellos métodos que requieren algún parámetro específico del sensor no disponible para Ingenio/Seosat, se ha utilizado la misma configuración considerada por Vivone *et al.*, (2015) para el

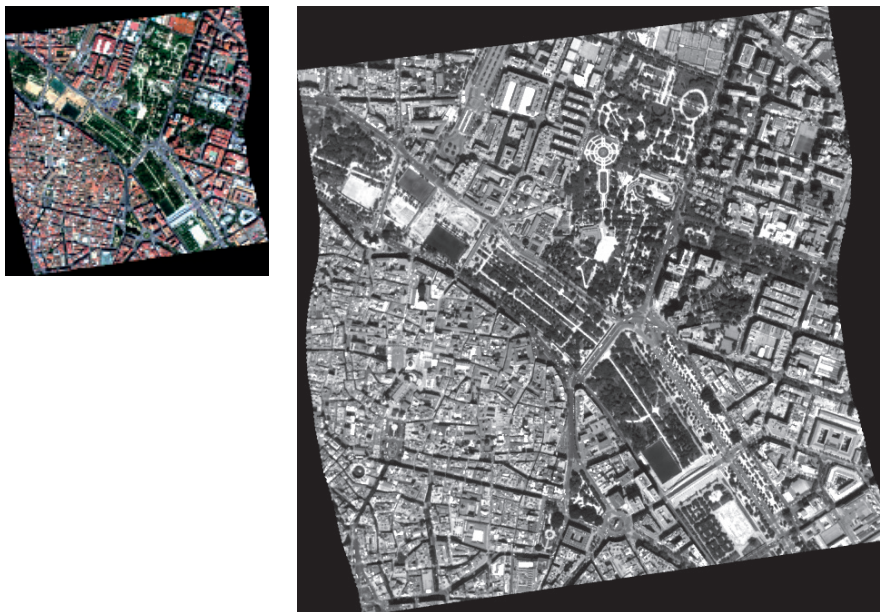


Figura 1. (Izqda.) Imagen RGB a partir de la multispectral obtenida del sensor CASI, en una zona de 1,7 km por 1,7 km sobre el centro de la ciudad de Valencia; (dcha.) Imagen en escala de grises de la banda pancromática.

satélite IKONOS. Por ejemplo, la función PSF (*Point Spread Function*) se consideró con forma gaussiana, de frecuencia de corte la de Nyquist del satélite IKONOS.

Para evaluar la bondad de cada uno de los algoritmos se siguió el siguiente procedimiento:

- a) Se analizó la calidad visual de los resultados a resolución real, así como su calidad espacial, siguiendo el protocolo propuesto por Zhou *et al.* (1998) el cual mide la correlación espacial entre la imagen resultado y la imagen PAN.
- b) Se analizó la calidad espectral y espacial de los resultados obtenidos a resolución reducida, siguiendo el protocolo propuesto por Wald *et al.* (1997). Este protocolo consiste en la evaluación de las imágenes resultado a una escala menor con objeto de emplear la imagen multispectral inicial como imagen de referencia. Los índices de calidad utilizados fueron los siguientes: SAM (*Spectral Angle Mapper*), RMSE (*Root Mean Squared Error*), ERGAS (*Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse*), sCC (*Spatial Correlation coefficient*), Índice SSIM (*Structural Similarity*), y PSNR (*Peak Signal-To-Noise Ratio*).

Hemos de indicar que, en general, la evaluación de los resultados de *pan-sharpening* es una tarea compleja, ya que las medidas de calidad a menudo obtienen resultados confusos o contradictorios respecto al aspecto visual de dichas imágenes. Cada medida se centra en analizar algunos aspectos del resultado, pero la calidad real de las mismas es algo más que la información que pueden proporcionar las medidas usadas habitualmente.

A la hora de elegir un método de *pan-sharpening* resulta aconsejable conocer la aplicación final de las imágenes ya que de ese modo podría realizarse una evaluación de los métodos en base al rendimiento obtenido en la tarea objetivo.

En el contexto de este proyecto, la idea es obtener un resultado lo más general posible, es decir, el resultado no debería estar orientado a ninguna aplicación en particular. Por tanto, se busca un resultado de *pan-sharpening* equilibrado en cuanto a la calidad espacial y espectral, ya que normalmente ambos aspectos de calidad se comportan de forma inversamente proporcional. En la Tabla 1 se muestra el resultado de la evaluación de los diferentes métodos.

Hemos de señalar que los mejores resultados desde el punto de vista espacial los obtienen los

Tabla 1. Evaluación de los métodos de *pan-sharpening* de Vivone *et al.*, (2015) sobre la imagen correspondiente a la Figura 1. Los valores se encuentran coloreados por columnas de mejor valor (verde) a peor valor (rojo).

<i>Pan-sharpening</i>	Time (s)	SAM	RMSE	ERGAS	sCC	Q-index	SSIM	PSNR
INT (L3)	0,02	5,29	481,90	8,14	0,9630	0,7525	0,7250	22,82
PCA	0,14	5,75	389,92	6,09	0,9762	0,8767	0,8434	17,17
IHS	0,02	6,15	364,02	6,28	0,9794	0,8765	0,8457	18,58
Brovey	0,02	5,29	486,11	9,07	0,9623	0,8742	0,8604	7,06
BDSB	0,18	6,32	280,78	4,08	0,9880	0,9481	0,9399	20,93
GS	0,09	5,30	354,22	5,50	0,9806	0,8975	0,8721	17,84
GSA	0,20	8,06	280,63	4,17	0,9880	0,9471	0,9350	25,47
PRACS	0,37	5,42	278,12	3,82	0,9878	0,9407	0,9347	23,60
HPF	0,07	5,04	270,62	3,84	0,9885	0,9487	0,9363	24,65
SFIM	0,07	5,20	290,56	3,89	0,9867	0,9460	0,9328	30,16
Indusion	0,11	5,41	315,31	4,58	0,9843	0,9301	0,9114	20,05
ATWT	0,38	5,61	277,32	3,92	0,9879	0,9491	0,9368	24,83
AWLP	0,39	7,11	357,13	4,90	0,9804	0,9261	0,9136	5,52
ATWT-M2	1,08	5,60	362,69	5,70	0,9797	0,8738	0,8527	23,83
ATWT-M3	1,10	5,94	351,44	5,06	0,9809	0,8989	0,8803	23,77
MTF-GLP (CBD)	0,17	5,69	277,01	3,88	0,9880	0,9511	0,9399	22,34
MTF-GLP-HPM-PP	0,33	5,99	351,62	4,80	0,9806	0,9262	0,9073	34,47
MTF-GLP-HPM	0,17	5,23	309,65	4,10	0,9854	0,9465	0,9360	33,45
MTF-GLP-CBD	0,17	8,17	293,08	4,49	0,9869	0,9411	0,9261	18,66

métodos BDSB, GSA (*Gram Schmidt Adaptive*) y MTF-GLP-CBD (de tipo *Generalized Laplacian Pyramid*). Desde el punto de vista espectral, los métodos ATWT (basado en Transformada Wavelet), MTF-GLP-CBD y PRACS (*Partial Replacement Adaptive Component Substitution*) resultan ser los que dan mejores resultados.

Haciendo una evaluación visual de las imágenes, los métodos llamados de “Sustitución de Componentes” (CS) ofrecen resultados muy buenos a nivel estructural pero tienden a alterar la información espectral. Por el contrario, los métodos basados en el MRA parecen mantener mejor la información espectral pero suelen alterar más la información espacial de la imagen. A nivel visual, los métodos que parecen más compensados son PRACS y MTF-GLP-CBD.

Considerando todo lo anteriormente comentado, los enfoques que parecen obtener un resultado más equilibrado para las imágenes de prueba son los métodos híbridos, es decir, aquellos que combinan características de los métodos de Sustitución de Componentes y de Análisis Multirresolución o los algoritmos más elaborados de la familia MRA.

Paralelamente, y teniendo en cuenta que los métodos que proporcionan mejores resultados implican una complejidad y un coste computacional alto, se probaron otros métodos que, siguiendo el mismo concepto que los basados en el MRA, minimizan las operaciones a aplicar para obtener un producto *pan-sharpened* de calidad equiparable a los primeros. Compañías como Digital Globe® o ASTRIUM GEO-Information® ofrecen productos fusionados generados utilizando como base el algoritmo SFIM (*Smooth Filtering-based Intensity Modulation*) propuesto por Liu (2000), que modula la información espacial de cada banda MS a partir del ratio entre la imagen PAN y una versión de ésta a la resolución espacial de la multiespectral (PAN_L). Para obtener imágenes de alta calidad espacial y espectral es fundamental generar de forma sencilla y fiable la imagen PAN_L , así como definir un modelo de ponderación o inyección del detalle que modifique la radiometría de la imagen MS en la dirección de la que ésta presentaría si hubiera sido adquirida a la resolución espacial de la PAN. En este trabajo se probaron los algoritmos propuestos por González-Audicana *et al.* (2006), Zhang (2004) y Zhang y Kumar (2014) para

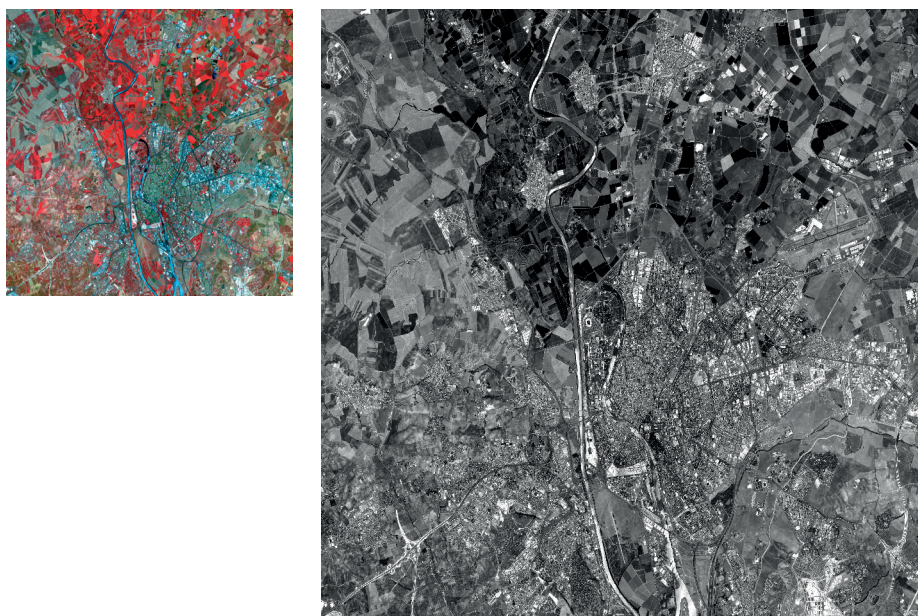


Figura 2. (Izqda.) Composición en falso color de 20,5 km por 20,5 km de la imagen MS SPOT 5 de la ciudad de Sevilla y alrededores; (Dcha.) Imagen PAN.

generar la imagen PAN_L, combinados con la modulación proporcional empleada por autores como Otazu *et al.* (2005) o la estandarización de histogramas previa de Zhang y Kumar (2014). Como la aplicación de algunos de estos algoritmos requiere de datos radiométricamente calibrados, en esta fase no ha sido posible utilizar las imágenes SEOSAT simuladas a partir de datos CASI, y se trabajó con una pareja de imágenes SPOT 5 adquiridas el 26 de junio de 2012 correspondientes a la ciudad de Sevilla y alrededores. En la Figura 2 se muestran las imágenes de partida utilizadas.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el análisis de calidad a las imágenes *pan-sharpened* generadas mediante uno de los métodos mejor valorados en el análisis anterior, PRACS, y con los métodos de bajo coste computacional SRF-P (*Spectral Response Function–Proportional*), SRF-M (*Spectral*

Response Function–Modulation) y el método SBF-M (*Statistics Based Fusion – Modulation*), también conocido como UNB, propuesto por Zhang (2004).

Visualmente apenas hay diferencias entre los resultados obtenidos con los algoritmos de *pan-sharpening* aplicados. El análisis de calidad de las imágenes según los protocolos mencionados, muestra que los algoritmos de bajo coste computacional testados en el marco de este proyecto proporcionan imágenes que, a pesar de tener calidad espectral algo menor, tienen una calidad espacial tan alta o incluso superior a las obtenidas con algoritmos complejos como el PRACS, con tiempos de procesamiento mucho menores. Estos resultados mejoran sensiblemente si antes de su aplicación se procede a una estandarización de los histogramas de las imágenes a fusionar (SBF-M SH).

Tabla 2. Evaluación de los métodos de *pan-sharpening* sobre la imagen correspondiente a la Figura 2. Los mejores resultados se muestran en verde y los peores en rojo.

<i>Pan-sharpening</i>	Tiempo (s)	ERGAS	sCC	SSIM
MULTI _{40m}		3,099	0,1166	0,4111
PRACS	4,1822	1,992	0,9732	0,7262
SRF-P	0,2348	2,398	0,9883	0,7197
SRF-M	0,1666	2,276	0,9841	0,7289
SBF-M	0,2958	2,269	0,9836	0,7287
SBF-M SH	0,3140	2,012	0,9849	0,7347

4. Súper-resolución

El conjunto de métodos de Súper-resolución desarrollados hasta la fecha es enorme. No obstante, no parece existir un esfuerzo paralelo en establecer una taxonomía adecuada que evidentemente sería de gran utilidad de cara a establecer líneas de investigación en el desarrollo de nuevas metodologías. La clasificación de estos métodos puede depender del dominio donde se aplique (en el espacial o en el espectral), los diferentes tipos de metodologías concretas usadas (perfiles de gradiente, redes neuronales, modelos de mezcla, etc.) o del conocimiento de los parámetros del sistema de adquisición de las imágenes. No obstante, muchos de estos métodos comparten propiedades similares, por lo que la clasificación puede llegar a ser compleja. En el artículo de Fernández-Beltrán *et al.*, (2016), proponemos una nueva taxonomía, de tal forma que planteamos una división en tres grupos principales: (a) métodos basados en estrategias de “reconstrucción”, (b) métodos basados en estrategias de “aprendizaje”, y (c) métodos híbridos.

En dicho artículo aplicamos 25 métodos de Súper-resolución, más un método de interpolación (“Lanczos-3”) sobre un conjunto de imágenes

aéreas de alta resolución espacial. En concreto, considerando que las imágenes aéreas dependen del tipo de modelo de imagen considerado, generamos un conjunto de imágenes a partir de las primeras, considerando varios supuestos respecto de dicho modelo de formación de imágenes. Esto nos proporciona, a nuestro juicio, tres ventajas: (1) teniendo las imágenes “verdaderas”, podemos aplicar protocolos de estimación de calidad basados en existencia/no existencia de dichas imágenes; (2) podemos generar un número alto de bases de imágenes, cambiando los parámetros y condiciones de los modelos de formación de imágenes; (3) controlando los cambios en dichos modelos podemos analizar el comportamiento de los métodos de Súper-resolución bajo condiciones controladas que queramos analizar.

Las imágenes “verdaderas” usadas en el proyecto se seleccionaron a partir del conjunto de “ortoimágenes” de acceso libre que tiene el Programa de Ortofotos Aéreo Nacional del Ministerio de Fomento. Consiste en imágenes RGB de 0,25 m de resolución espacial, por tanto, de mayor resolución que las de los satélites World-View-3 (PAN: 0,31 m, MS: 1,24 m) o GeoEye-2 (PAN: 0,34 m, MS: 1,36 m), estando accesibles de forma gratuita

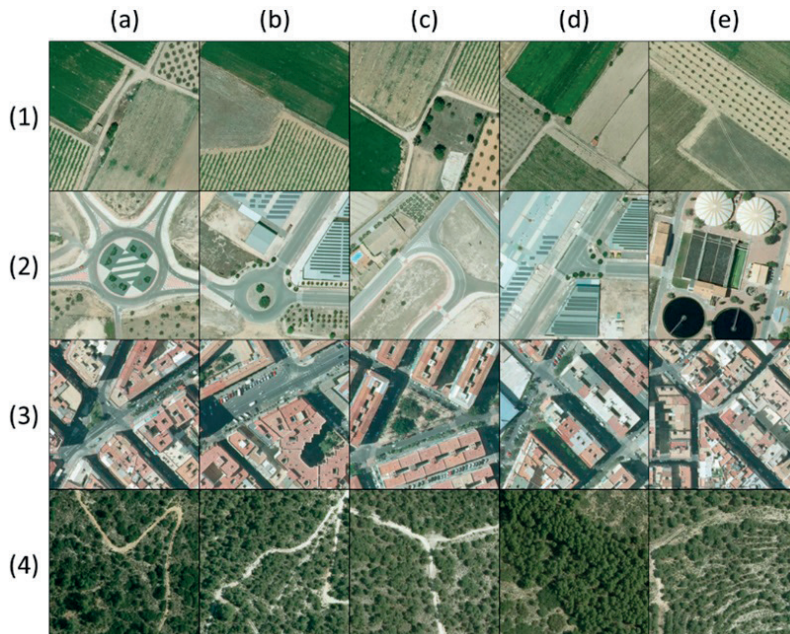


Figura 3. Imágenes “verdaderas” (RGB, 512×512, 0,25 mpp). Cinco imágenes diferentes: de (a) a (e), de áreas agrícolas (1), industriales (2), urbanas (3) y forestal (4).

a través de la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN). En concreto, se extrajo un conjunto de 20 imágenes de alta resolución de 512×512 píxeles de la provincia de Alicante, pertenecientes a cuatro tipos diferentes de áreas: (1) agrícola, (2) industrial, (3) urbana, (4) bosque. La Figura 3 muestra las imágenes consideradas en los experimentos hechos.

A partir de este conjunto inicial de imágenes, se generaron 6 conjuntos de imágenes, correspondientes a: (a) incremento en un factor 2× la resolución espacial; (b) incremento en un factor 4×; (c)-(d) casos (a)-(b) con adición de un 0,01% de ruido gaussiano “blanco”; (e)-(f) casos (a)-(b) con adición de un 0,05% de ruido gaussiano “blanco”.

Existen figuras de mérito que necesitan de la existencia de una imagen de referencia, y otras que no. Dentro de las primeras, usamos la medida SAM, RMSE, *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR), ERGAS, CC, Q-Index, y SSIM. Dentro de las que asumen que no hay imagen de referencia se usaron dos: *Blind Referenceless Image Spatial Quality Evaluator* (BRISQUE) y la *Natural Image Quality Evaluator* (NIQE).

La Figura 4 muestra la función de mérito PSNR (*Peak Signal-To-Noise Ratio*) normalizada al intervalo [-1, 1] (de tal forma que cuanto más

cercano a 1 sea el valor, mejor, siendo 0 el valor de la interpolación de “Lanczos”, cogida como función base de comparación para el resto de métodos) para el caso de la Súper-resolución con un factor 2× y un factor 4×, en la que no se ha introducido ruido adicional.

Como conclusiones más importantes podemos destacar, por un lado, que los cuatro mejores métodos son 08SDS (Dong *et al.*, 2011), 25FSR (Zhao *et al.*, 2015), 07LSE (Freedman y Fattal, 2011) y 03GPP (Sun *et al.*, 2008), los cuales son de tipo: “codificación dispersa”, “deconvolución PSF”, híbrido, y de “perfil de gradiente”, aunque en términos generales, el método 08SDS (Dong *et al.*, 2011) es el que da mejores resultados. Por otro lado, también hemos de destacar que el aumento del factor de resolución, de 2× a 4× disminuye de forma significativa la capacidad de “reconstrucción” de los métodos de Súper-resolución. Estas conclusiones también son válidas para el caso de la introducción de ruido gaussiano en las imágenes.

Hemos de destacar que no se ha seguido ningún tipo de estrategia para optimizar los valores de los parámetros definidos en cada uno de los métodos. Es probable que los resultados de dichos métodos mejoren si se escogen valores óptimos de los mismos. Por otra parte, se ha observado que el método de interpolación de “Lanczos-3” da mejores resultados de lo esperado, mejores que algunos de los

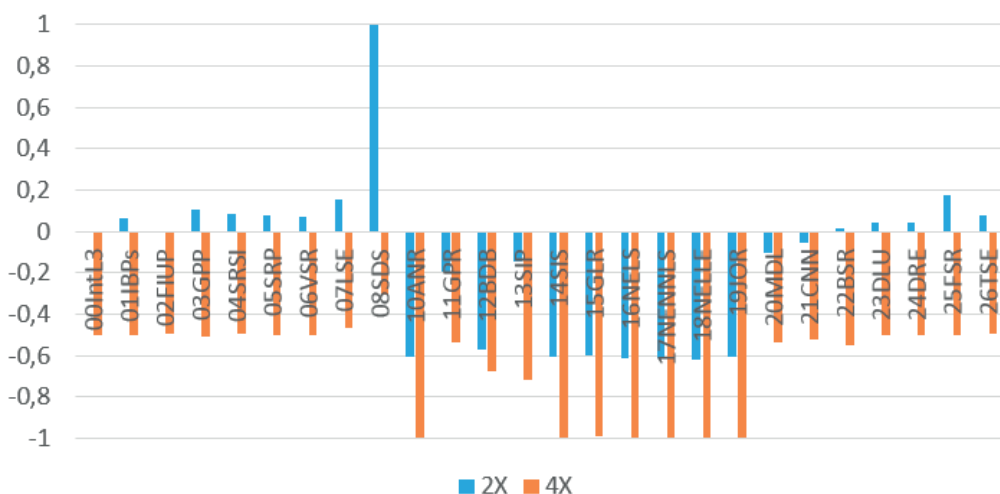


Figura 4. Gráfico de barras de la función de mérito PSNR para los 26 métodos de Súper-resolución, factores de resolución 2× y 4×, sin ruido añadido.

métodos de Súper-resolución usados. En resumen, el mejor resultado para Ingenio se puede obtener con métodos híbridos de bajo coste computacional.

5. Producto de reflectividad

Con el objetivo de realizar la corrección atmosférica se proponen los siguientes pasos:

5.1. Máscara de nubes

Dadas las características espectrales y de resolución temporal de Seosat, el enmascaramiento de las nubes se llevará a cabo mediante un método de umbrales tales como en el caso de Irish *et al.*, (2006). La filosofía de estos métodos se basa en explotar las características físicas que reúnen los cuerpos nubosos: (1) Las nubes son brillantes, hecho que se traduce en unos altos niveles de radiancia en el rango visible, (2) Las nubes son blancas, por lo que se espera un espectro aproximadamente plano en el visible, (3) Las nubes son frías, fácilmente detectable en el térmico, y (4) se encuentran a una elevada altura sobre la superficie terrestre, detectable en bandas de absorción sensibles a los cambios de presión. Sin embargo, para la detección de las características (3) y (4) sería necesaria la contribución de alguna banda en el térmico (Irish *et al.*, 2006), al igual que alguna banda localizada en la región de absorción del O2-A (Gómez-Chova *et al.*, 2007). No obstante, mediante el uso de las bandas disponibles en Seosat, la detección de nubes se puede llevar a cabo mediante la aplicación de umbrales que discriminen las características físicas (1) y (2).

Desde un punto de vista estratégico para el procesado de productos de Nivel-2, el enmascaramiento de nubes debe ser preferiblemente conservador, esto es, dejando la imagen totalmente libre de nubes aun etiquetando falsos píxeles nubosos. Esto es así, puesto que gran parte de los algoritmos de corrección atmosférica necesitan estimar la presencia de aerosoles en la atmósfera, y el efecto de enturbiamiento o emborronamiento que estos producen en la imagen puede ser fácilmente confundido con el efecto producido por las nubes, especialmente nubes delgadas de tipo cirrus, o bien por bordes de nubes brillantes no enmascarados.

5.2. Corrección de sombras

La corrección de sombras topográficas tiene un gran impacto en la filosofía del método de corrección atmosférica planteado para Ingenio. Al tratarse de un método que pretende explotar la información en el dominio espacial, y especialmente fijándose en las transiciones entre bordes que aparecen en las imágenes (Sección 5.3), es necesario que ambas superficies, alrededor de bordes, se encuentren iluminadas bajo unas condiciones aproximadamente homogéneas. De esta forma, al tener un enmascaramiento de aquellos píxeles que dada la geometría de iluminación y el relieve topográfico sean etiquetados como sombras, quedarán exentos de formar parte del algoritmo de corrección atmosférica.

5.3. Obtención de la reflectividad de superficie

En el caso de sensores multiespectrales, tales como Landsat-8, Sentinel-2, Sentinel-3, etc., los algoritmos de corrección atmosférica están basados en la explotación de la información proporcionada por los diferentes canales espectrales, pudiendo así estimar la concentración de diferentes gases como el vapor de agua o la presencia de aerosoles. De esta forma, y junto con algunas hipótesis de partida, tales como el perfil vertical de temperaturas, la distribución vertical de aerosoles, etc., los efectos atmosféricos pueden ser corregidos y la reflectividad en superficie estimada. Sin embargo, cuando la información espectral es limitada como en el caso de Ingenio, la corrección atmosférica deber venir dada por la explotación de los efectos atmosféricos causados a nivel espacial. Tal y como se ha mencionado en 5.1, los aerosoles producen un efecto de emborronamiento de la imagen fácilmente detectable a altas resoluciones espaciales, especialmente entre bordes de diferentes superficies. Estos efectos de emborronamiento fueron ya estudiados en los años 80 por Yoram Kaufman, (Kaufman, 1982; 1984; Mekler y Kaufman, 1982). Basándose en los citados estudios, el efecto de emborronamiento producido por los aerosoles puede ser descrito mediante la expresión

$$L(X, Y) \approx F^{-1} \{F[\rho(X, Y)] M(k_x, k_y)\} + L_0 \quad (1)$$

Donde F y F^{-1} son la transformada y transformada inversa de Fourier, L_0 es la radiancia ascendente atmosférica, k_x y k_y son las frecuencias espaciales

en los ejes x e y , y M es la correspondiente Función de Transferencia Modulada (MTF siglas en inglés) de la atmósfera, la cual se define como

$$M(k_x, k_y) = M_N(k_x, k_y) M_0(k=0) \tag{2}$$

donde M_0 es la contribución dada a frecuencia $k=0$, y M_N se define como una función de transferencia modulada normalizada cuya expresión empírica (3) muestra una dependencia paramétrica dada por la altura y el espesor óptico molecular y de aerosoles (ver Figura 5).

$$M_N(k_x, k_y) = 1 - 0,5\tau_r [1 - \exp(-2,5kH_r)] - 0,7\lambda^{-0,2}\tau_a [1 - \exp(-1,3kH_a)] \tag{3}$$

donde H_r y H_a son las alturas donde se sitúan la máxima concentración molecular y de aerosoles y τ_r y τ_a es el espesor óptico molecular y de aerosoles respectivamente.

Así pues, asumiendo fijados los parámetros relativos a la información molecular, pues su impacto es menos notable, como se aprecia en la Figura 5, se procede a detectar los bordes presentes en la imagen y aplicar un algoritmo iterativo de deconvolución variando los parámetros de la expresión relativos a los aerosoles (Ec. 2).

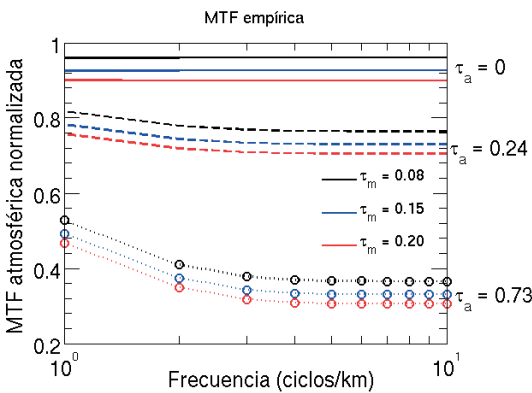


Figura 5. Dependencia de la función de transferencia modulada normalizada, $M_N(k_x, k_y)$, con el espesor óptico de los aerosoles (τ_a) y el espesor óptico molecular (τ_r) para diferentes frecuencias según la expresión (3).

El algoritmo itera barriendo un gran rango de valores de τ_a (asumiendo una H_a) para finalmente calcular qué espesor óptico obtiene una transición ideal, no suavizada, entre aquellos píxeles situados a ambos lados de los bordes previamente

detectados en la imagen y que, por lo tanto, anula el efecto de emborronamiento de los aerosoles (Figura 6). El esquema básico del algoritmo viene representado en la Figura 7, donde se incluye también una versión más avanzada, la cual no sólo estima el espesor óptico de los aerosoles, sino también la altura media de la capa de máxima concentración.

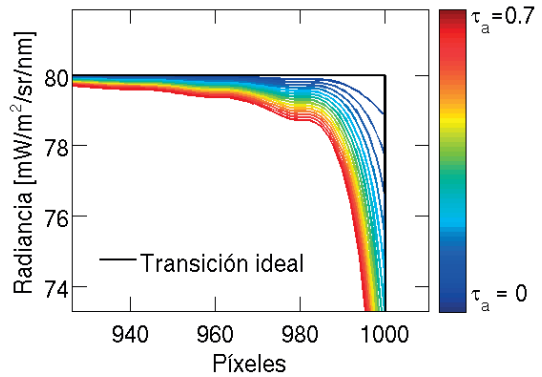


Figura 6. Suavizado en la transición entre dos píxeles de radiancias diferentes suavizada mediante la aplicación de la MTF normalizada atmosférica para diferentes valores del espesor óptico de los aerosoles.

Este algoritmo es aplicado principalmente a la banda del azul, la cual muestra una mayor sensibilidad a la presencia de aerosoles. Una vez obtenidos los parámetros que modulan la M_N , algunos tales como el τ_a son fácilmente traducidos en el resto de bandas mediante la ley de Angstrom. Otros como H_a se consideran constantes en todas las bandas espectrales.

6. Corrección topográfica

6.1. Introducción

Los algoritmos de corrección topográfica (TOC) tienen por objetivo compensar las diferencias en la radiancia que detecta un sensor remoto como consecuencia de la distinta pendiente y orientación de las laderas en las que se ubican distintas cubiertas. En las últimas décadas se han propuesto numerosos métodos TOC que se pueden agrupar en tres grandes categorías (Figura 8): Métodos empíricos, métodos semi-empíricos y métodos de base física (Sola et al., 2015). Los métodos empíricos, principalmente basados en ratios entre bandas, son los más simples pero no suelen proporcionar buenos resultados (Blesius y Weirich, 2005), mientras

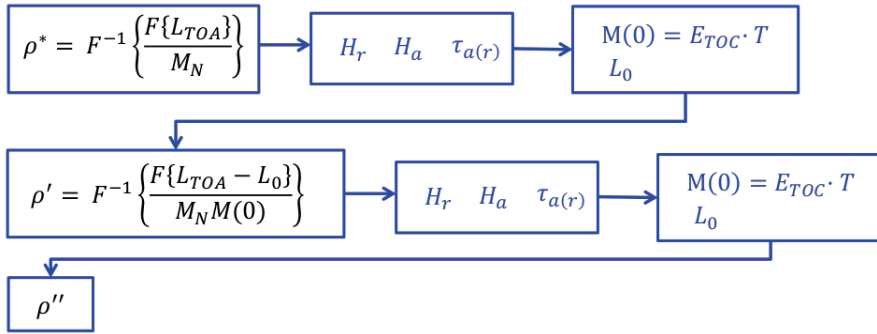


Figura 7. Algoritmo iterativo para la obtención de la reflectividad. El algoritmo es aplicado en la banda del azul la cual muestra una sensibilidad mayor a la presencia de aerosoles.

que los métodos de base física resultan complejos y requieren del cálculo de un gran número de parámetros no siempre disponibles a la escala y en el momento requeridos. Los métodos semiempíricos son los más empleados para minimizar el efecto topográfico ya que ofrecen un adecuado equilibrio entre rendimiento y complejidad.

6.2. Algoritmos TOC evaluados

En este trabajo se han implementado y probado 10 métodos TOC semiempíricos, seleccionados en base a la calidad de los resultados que aportan, su popularidad y su sencillez de implementación y coste computacional.

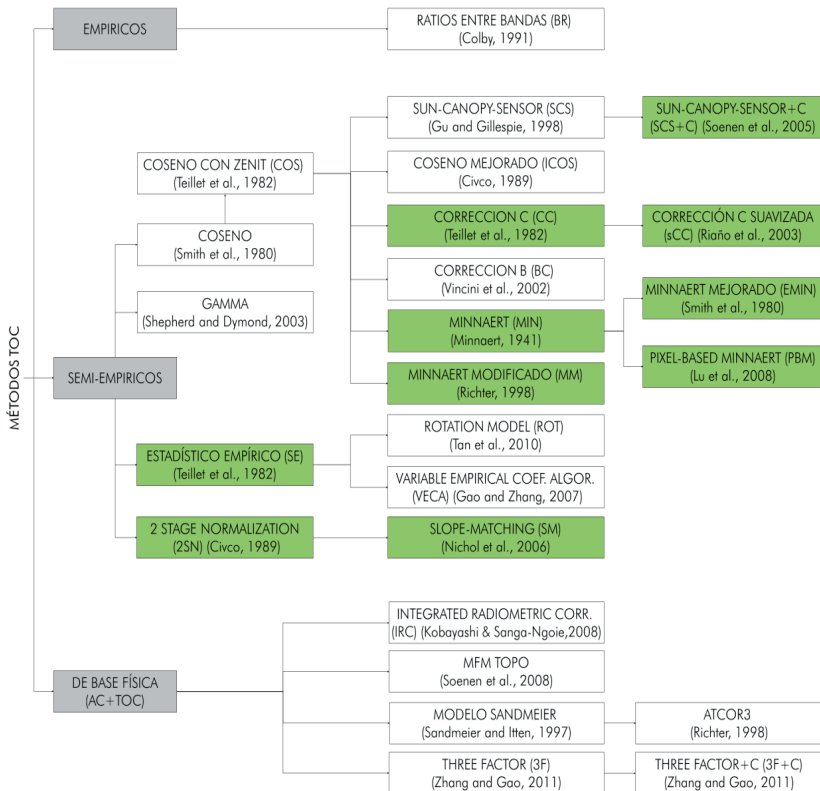


Figura 8. Esquema de los métodos TOC más empleados. Resaltados en verde los empleados en este proyecto.

Como no se dispone de imágenes SEOSAT simuladas en las que se recoja y simule el efecto de la topografía, se han utilizado dos conjuntos de datos SPOT 5 para analizar el comportamiento de cada uno de los métodos anteriores:

1. Tres imágenes SPOT 5, correspondientes a una misma zona de estudio, con igual relieve topográfico y similar distribución de cubiertas, adquiridas en distinta fecha (Figura 9).
2. Tres imágenes SPOT5, correspondientes a distintas zonas, con diferente relieve y distribución de cubiertas, adquiridas en distinta fecha (Figura 10).

Un factor importante a la hora de escoger el método TOC más adecuado para cada caso particular es la evaluación de la calidad de la corrección realizada. Aunque son numerosas las estrategias de evaluación propuestas para cuantificar la calidad de la corrección topográfica, la mayoría tiene sus limitaciones y no hay un criterio que resulte suficientemente robusto, objetivo y que genere consenso en la comunidad científica. Por ese motivo, en este trabajo se ha optado por realizar un

análisis de calidad multi-criterio, considerando los siguientes aspectos:

1. Evaluación visual, basada en comparación por pares de imágenes corregidas.
2. Reducción de la dependencia entre el coseno del ángulo de incidencia solar y la radiancia en cada banda espectral. A mayor reducción, mejor es la corrección.
3. Reducción de la variabilidad de cada clase o cubierta en cada banda, medida mediante la reducción del índice intercuartil (IQR) de las radiancias de las cubiertas tras la corrección. A mayor reducción, mejor es la corrección.
4. Reducción de la diferencia en la radiancia media entre píxeles de una misma cubierta situados en laderas en solana y en umbría. Lo ideal es que la diferencia se reduzca completamente tras la corrección.
5. Estabilidad de mediana de cada clase o cubierta en cada banda.
6. Presencia de valores aberrantes, también conocidos como *outliers*, tras la corrección. Como el criterio anterior, no evalúa la bondad de la corrección, sólo la robustez del método.

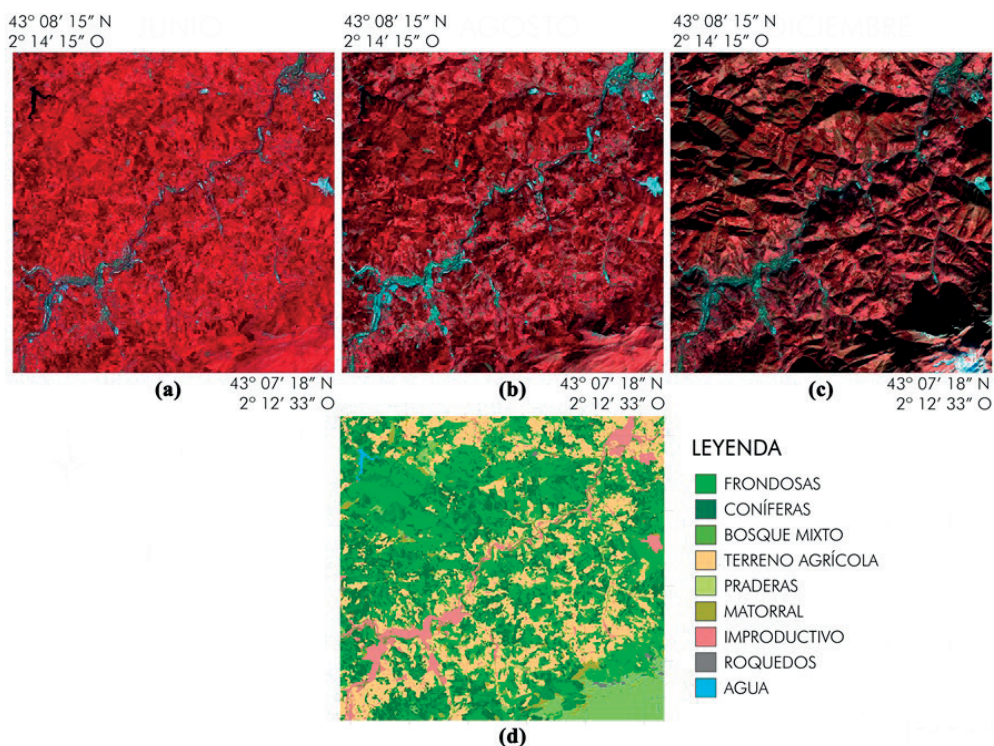


Figura 9. Imágenes SPOT 5 del NE de Guipúzcoa a) 23 de junio de 2009, b) 30 de agosto de 2008, c) 26 de diciembre de 2006, d) cartografía de cubiertas.

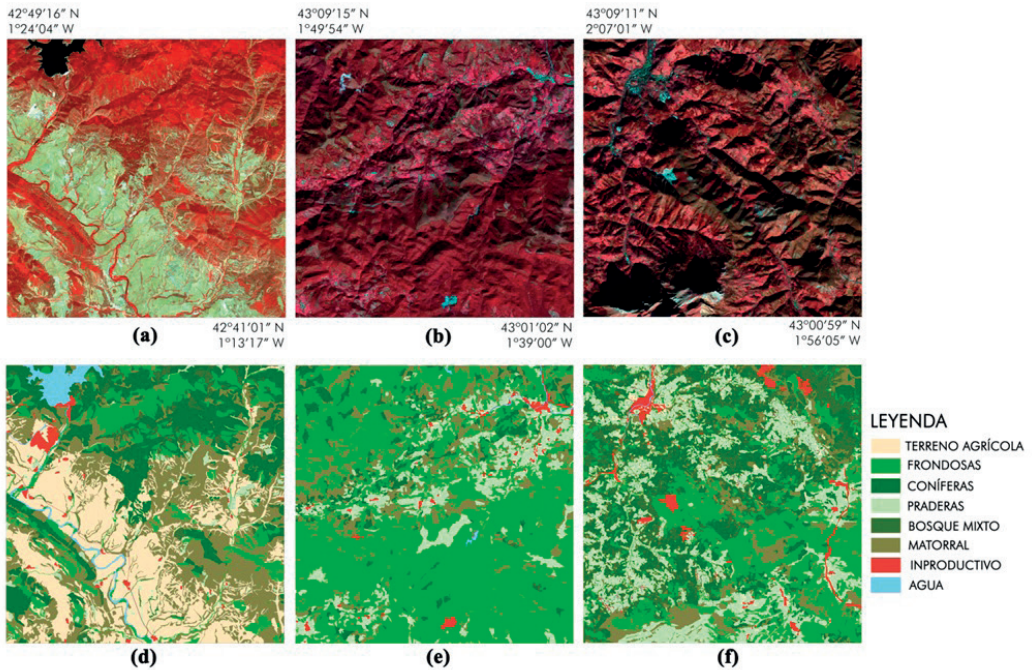


Figura 10. Imágenes SPOT 5 a) zona NE de Navarra, 15 de agosto de 2009, b) zona N de Navarra, 15 de agosto de 2009 c) zona NE de Guipúzcoa, 26 de diciembre de 2006 y d), e) y f) cartografía de cubiertas de cada una de las zonas.

7. Evaluación basada en imágenes sintéticas, siguiendo el procedimiento propuesto por Sola *et al.* (2014), validado en Sola *et al.* (2015). La metodología se basa en comparar imágenes simuladas con el relieve real (SR), corregidas topográficamente, con imágenes simuladas sin considerar el relieve (SH), es decir, con aquellas que habría captado un sensor en ausencia de relieve.

Cada criterio de evaluación proporciona datos en términos y escalas distintos, por lo que, para cada caso se ha elaborado un *ranking* de métodos en función de cada criterio de evaluación (Tablas 3 y 4), valorándolos con una puntuación de 1 a 10 según éstos proporcionen mejor a peor resultado. Los métodos con menor valor promedio de *ranking* (en negrita en las Tablas 3 y 4)

Tabla 3. *Ranking* multi-criterio de métodos TOC (1=el mejor, 10=el peor) para el conjunto de datos 1 (Figura 9). Se resaltan los mejores en negrita.

IMAGEN	CC	sCC3	SCS+C	SE	MIN	EMIN	PBM	MM	2SN	SM
Junio	4,29	6,14	3,86	3,57	4,86	7,57	7,14	9,71	2,57	5,29
Agosto	3,57	5,71	3,43	3,57	5,29	7,00	7,14	9,29	3,71	6,29
Diciembre	4,57	4,57	4,29	2,29	6,14	6,86	7,86	9,29	5,43	3,43
PROMEDIO	4,14	5,48	3,86	3,14	5,43	7,14	7,38	9,43	3,90	5,00

Tabla 4. *Ranking* multi-criterio de métodos TOC (1=el mejor, 10=el peor) para el conjunto de datos 2 (Figura 10).

IMAGEN	CC	sCC3	SCS+C	SE	MIN	EMIN	PBM	MM	2SN	SM
NE Navarra	3,57	4,86	2,00	3,43	4,14	6,43	6,14	8,86	8,00	7,57
N Navarra	3,14	4,71	2,43	2,57	5,29	7,29	7,14	9,00	9,00	4,29
NE Guipúzcoa	2,71	4,00	2,43	2,57	6,43	7,14	7,57	8,14	7,86	6,14
PROMEDIO	3,14	4,52	2,29	2,86	5,29	6,95	6,95	8,67	8,29	6,00

son los que permiten generar mejores imágenes según todos los criterios de evaluación de calidad considerados.

Aunque las diferencias entre los mejores métodos TOC son mínimas, el análisis de la calidad de las imágenes corregidas según los criterios mencionados, muestra que los algoritmos SE, SCS+C y CC proporcionan resultados ligeramente superiores al resto, tanto en el análisis visual como en los criterios cuantitativos de evaluación de la calidad de las imágenes corregidas.

En los dos conjuntos de datos se aprecia que ninguno de los diez métodos testados consigue corregir completamente el efecto del relieve en aquellos píxeles a los que no llega irradiancia directa debido a la topografía del terreno y a la geometría solar en el momento de adquisición de la imagen (imágenes de diciembre, Figuras 9.c y 10.c), requiriéndose un análisis específico en estas zonas más problemáticas.

7. Generación de mosaicos espaciales y compuestos temporales

Para los sensores de estas características, en los que la alta resolución espacial conlleva un menor campo de visión y por tanto una menor extensión de cada escena, es importante la generación de mosaicos con el fin de abarcar un área de trabajo extensa con una sola imagen sintética lo más homogénea posible. Esto nos lleva a la necesidad de corrección entre las distintas escenas, tanto geométrico como radiométrico.

7.1. Corrección geométrica

Las escenas individuales de Ingenio nivel 1C pancromáticas tienen una especificación de precisión de geolocalización en vista nadiral de 2,5 m de RMSE-2D máximo, tras el procesamiento realizado en el segmento terreno utilizando menos de 20 puntos de control. Considerando que el error está uniformemente distribuido, resulta que en el 95% de los casos el error se encuentra en el intervalo [-5 m, 5 m] ya que el procedimiento de ajuste del algoritmo de geolocalización debe eliminar cualquier sesgo. Sin embargo, cuando se genera un mosaico se pueden producir diferencias geométricas relativas en las zonas de solape entre escenas, especialmente si son de distintas órbitas,

de ± 10 m, es decir 4 píxeles. Esto podría provocar discontinuidades geométricas en elementos cartografiados. Para evitar este problema, se aplican métodos de ajuste en bloque de las escenas utilizando puntos de enlace medidos en las zonas de solape y nuevos puntos de control. Estos métodos no son aplicables al producto Nivel 1C, debiendo partir bien del modelo riguroso del sensor, o bien del modelo de polinomios racionales (RPCs), menos exigente en número de puntos de control. En este caso, se parte de las imágenes Nivel L1B2 que incluyen en su cabecera los coeficientes de los RPCs de grado 3 calculados con puntos de control extraídos de una ortoimagen y modelo de elevaciones de referencia. El método más extendido, normalmente implementado en los programas comerciales de ajuste en bloque de imágenes *pushbroom*, calcula para cada escena los 6 parámetros de una transformación afín plana para minimizar los errores residuales de geolocalización (Ecuaciones 4 y 5, Grodecki y Dial, 2003):

$$x+a_0+a_1x+a_2y=RPC_x(\varphi, \lambda, h) \quad (4)$$

$$y+b_0+b_1x+b_2y=RPC_y(\varphi, \lambda, h) \quad (5)$$

Donde (x, y) son las coordenadas imagen, (φ, λ, h) son las coordenadas terreno; (a_i, b_i) $i=0, 1, 2$ son los coeficientes de la transformación afín; (a_0, b_0) tienen en cuenta errores sistemáticos en posición y desalineamiento en orientación, así como errores geométricos internos residuales y $(a_{1,2}, b_{1,2})$ tienen en cuenta errores de deriva.

Nos planteamos en primer lugar la evaluación de este modelo de ajuste de RPCs para escenas Ingenio teniendo en cuenta el diseño específico del instrumento. Como se ha comentado, las escenas pancromáticas se capturan desde dos cámaras cada una con dos CCD, por lo que la imagen está formada en realidad por cuatro subescenas que han sido capturadas en distintos momentos. Para realizar dicha evaluación, se han simulado 3 pasos de 27 segundos para sintetizar un bloque de imágenes L1B2 a partir de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (Figura 11). Para cada imagen se calculan dos conjuntos de RPCs a partir de 80 puntos de control sintéticos (x, y) , (φ, λ, h) :

(i) RPCs sin errores según la evolución teórica de la posición del satélite y la orientación del instrumento durante el tiempo de adquisición, y (ii) RPCs introduciendo errores residuales simulados en los puntos de control después del ajuste de las

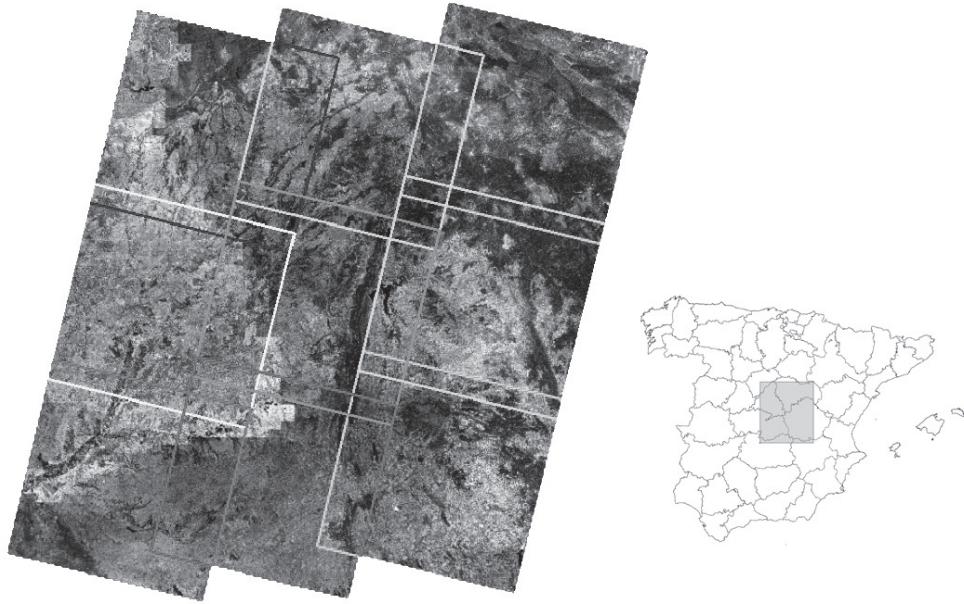


Figura 11. Bloque de 3 x 3 imágenes pancromáticas simuladas, en una zona entre Madrid y Castilla la Mancha.

perturbaciones de la órbita y de la actitud, distorsión óptica y distorsión termoelástica, para cada sensor pancromático y cada cámara. A partir de estas imágenes sintéticas, se evaluarán los resultados de la orientación en bloque de las imágenes L1B2 y se generarán los productos L1C (simulado de la misión) y L2 (empleando los RPCs ajustados) para construir los mosaicos y analizar los resultados obtenidos en cada caso. El GSD del mosaico será el de las escenas individuales, utilizándose el mismo método de remuestreo empleado para generar el nivel 1C, y garantizando el alineamiento de los píxeles con coordenadas de las esquinas múltiples del GSD (Villa *et al.*, 2016). Con el ajuste en bloque se espera mantener el RMSE y reducir las discrepancias geométricas relativas entre escenas hasta un umbral pendiente de evaluar en función de la topografía de la zona y la distribución de los puntos de control y de enlace.

7.2. Corregistro radiométrico

Las escenas que cubren una zona, en general de distintas fechas, tendrán niveles digitales (ND) distintos en los mismos puntos sobre el terreno de los solapes entre escenas. Estas diferencias de ND, que pueden llegar a ser muy grandes (ver Figura 12 izquierda), se deben a: (i) Cambios en la

irradiancia solar exoatmosférica, (ii) Cambios en la posición e inclinación del Sol respecto al punto de incidencia, que genera el efecto de “sombreado topográfico”, (iii) Cambios en la composición y estado de la atmósfera, (iv) “*Bidirectional Reflectance Distribution Function*” (BRDF) de la superficie, (v) Cambios en el terreno y en los objetos que se encuentran sobre él. (vi) Por otra parte muchas de las escenas contendrán partes cubiertas con nubes y sombras de nubes.

Los métodos tradicionales para homogeneizar los valores radiométricos de un bloque de imágenes intentan corregir simultáneamente todos estos efectos mediante un único ajuste empírico, normalmente aplicando una ganancia y un sesgo constantes para cada banda y cada escena (Villa y Montoro, 1993). Nos proponemos refinar este método, considerando cada efecto por separado, para así tener un mayor control del resultado y optimizarlo para cada aplicación. El método propuesto incluye las siguientes fases:

a) Correcciones “físicas”: mediante los algoritmos desarrollados en otras partes de este proyecto se pueden aplicar: (i) Enmascarado de nubes y sombras de nubes; (ii) Corrección atmosférica; (iii) Corrección de BRDF; (iv) Corrección de sombreado topográfico.

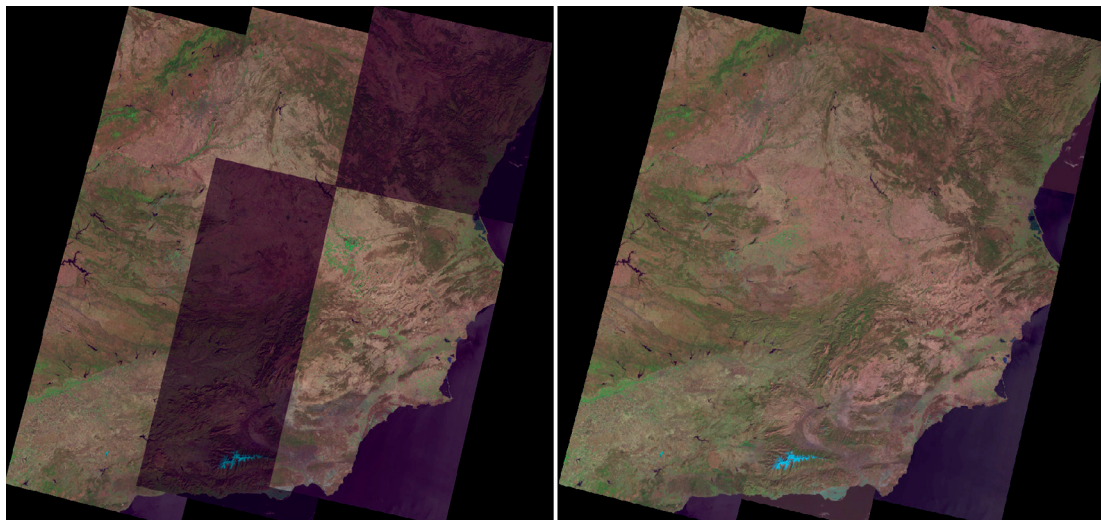


Figura 12. Izquierda: mosaico de 9 imágenes Landsat 8 en bruto. Derecha: mosaico después del correjistro radiométrico.

b) Ajuste de residuos por mínimos cuadrados:

Los errores residuales de los pasos anteriores se corrigen mediante la “intercalibración” de los ND, comparando los “píxeles pseudoinvariantes” (PPI) de las zonas de solape y ajustando el conjunto por mínimos cuadrados. Estos métodos de intercalibración mediante PPI han sido aplicados anteriormente con éxito a la homogeneización de series temporales Landsat, entre otras (Vicente-Serrano *et al.*, 2008, Pons *et al.*, 2014). Dichos PPI se seleccionan automáticamente con los criterios de NDVI constantemente bajo a lo largo de todo el año y variaciones pequeñas en los ND relativas a sus vecinos. Más adelante se evaluará la precisión del ajuste sobre los PPI en distintas zonas test. Las nubes y sombras de nubes se eliminan automáticamente tanto de los cálculos como del mosaico final usando las máscaras de la fase anterior. Las sombras arrojadas (“*cast shadows*”) se pueden calcular a partir de la posición del Sol usando un modelo de superficie y eliminarse de los cálculos. La corrección del sombreado topográfico no es imprescindible si los PPI se restringen a zonas planas horizontales y sin “*cast shadows*”. Asimismo la corrección atmosférica se puede obviar si es suficiente con una “intercalibración” relativa, cosa que ocurre en muchos casos.

c) Consideración de los cambios en el terreno:

Las variaciones circunstanciales de la cubierta (ej. charcos de agua, etc.) se detectan como “*outliers*” en la regresión de los ND en los PPI comunes a

dos escenas, y se pueden eliminar del cálculo y del mosaico. Dependiendo de cada aplicación y tipo de usuario, las variaciones fenológicas se pueden dejar intactas si se usan PPI, o bien se puede optar por reducir su efecto visual si se incluyen también zonas con vegetación en el ajuste del paso b). El resultado de los pasos b) y c) puede verse en la Figura 12 (derecha) para el caso de 9 escenas Landsat 8 del Sureste de España. Los procesos del paso a) se aplicarán cuando estén listos los algoritmos definitivos y se disponga de imágenes reales o simuladas incorporando tales efectos. El correjistro radiométrico supone alteraciones sobre la radiometría original que pueden impedir el uso de los compuestos resultantes en aplicaciones que la requieran, como por ejemplo el análisis de series temporales (clasificación automática multitemporal, etc.). El usuario de estos productos debe ser consciente de esto.

Por otra parte, una forma más avanzada de conseguir un mosaico homogéneo de Ingenio para una fecha dada, se basa en aprovechar la sinergia entre la alta frecuencia temporal de Sentinel-2 y la alta resolución espacial del pancromático de Ingenio, sintetizando imágenes con ambas características. Para ello, se están desarrollando métodos que, partiendo de una escena Ingenio interpolada temporalmente (ver Villa *et al.*, 2013) a la fecha de una escena Sentinel-2, disminuye los errores de interpolación mediante una ventana deslizante de “control” con respecto a la escena Sentinel-2.

8. Conclusiones y perspectivas

En este trabajo se muestran los primeros resultados de un proyecto coordinado orientado a la elaboración de productos avanzados del satélite español Ingenio.

Se han evaluado una gran cantidad de algoritmos de *pan-sharpening* con diferentes costes computacionales obteniendo que el mejor resultado se puede alcanzar con métodos híbridos de bajo coste computacional.

Se han evaluado 25 métodos de Súper-resolución observando que los cuatro mejores métodos son 08SDS, 25FSR, 07LSE y 03GPP y que el aumento del factor de resolución, de $2\times$ a $4\times$ disminuye de forma significativa la capacidad de reconstrucción de los métodos de Súper-resolución. También se ha probado el método de interpolación “Lanczos-3” observando mejores resultados de los esperados.

Se propone un algoritmo iterativo para la obtención de la reflectividad con máscara de nubes, corrección de sombras y corrección topográfica.

Se ha analizado la mejor metodología para la composición de mosaicos y se propone un método mejorado para eliminar las diferencias radiométricas en un mosaico.

Todos estos productos, utilizados en sinergia con las imágenes Landsat-8 o Sentinel-2, pueden proporcionar una alta resolución espacial que mejore sensiblemente la información obtenida por estas misiones. Finalmente hay que recordar la necesidad de las actividades de Calibración/Validación con datos reales una vez la misión esté en órbita, para la validación de todos estos productos.

9. Agradecimientos

Este artículo ha sido posible gracias al proyecto coordinado “Generación de Productos de Nivel 2 para la Misión INGENIO/SEOSAT”, ESP2013-48458-C4-1-P, subvencionado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia.

Referencias

Blesius, L., Weirich, F. 2005. The use of the Minnaert correction for land-cover classification in mountainous terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 26(17), 3831-3851. <https://doi.org/10.1080/01431160500104194>

- de Lussy, F., Kubik, P., Greslou, D., Pascal, V., Gigord, P., Cantou, J. P. 2005. Pleiades-HR image system products and quality. *Proceedings of ISPRS Hannover Workshop 2005: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*.
- Do, M. N., Vetterli, M. 2005. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 14(12), 2091-2106. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.859376>
- Dong, W., Zhang, D., Shi, G., Wu, X. 2011. Image deblurring and super-resolution by adaptive sparse domain selection and adaptive regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 20(7), 1838-1857. <https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2108306>
- Fernández Beltrán, R., Latorre-Carmona, P., Pla, F. 2017. Single-frame super-resolution in remote sensing: a practical overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38(1), 314-354, <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264027>
- Freedman, G., Fattal, R. 2011. Image and video upscaling from local self-examples. *ACM Transactions on Graphics*, 30(2), 1-11. <https://doi.org/10.1145/1944846.1944852>
- Gómez-Chova, L., Camps-Valls, G. Calpe-Maravilla, J., Guanter, L., Moreno, J. 2007. Cloud-screening algorithm for ENVISAT/MERIS multispectral images. *IEEE on geoscience and remote sensing*. 45(12), 4105-4118. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.905312>
- González-Audicana, M., Otazu, X., Fors, O., Alvarez-Mozos, J. 2006. A low computational-cost method to fuse IKONOS images using the spectral response function of its sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6), 1683-1691. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.863299>
- Grodecki, J., Dial, G. 2003. Block adjustment of high resolution satellite images described by rational polynomials, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1), 59-68. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.1.59>
- Irish, R., Baker, J., Goward, S., Arvidson, T. 2006. Characterization of the Landsat-7 ETM+ Automated Cloud Cover Assessment (ACCA) algorithm. *Photogrammetric engineering & remote sensing*. 72(10), 1179-1188. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.10.1179>
- Kaufman, Y. 1982. Solution of the equation of radiative transfer for remote sensing over nonuniform surface reflectivity. *Journal of geophysical research*. 87(C6), 4137-4147. <https://doi.org/10.1029/JC087iC06p04137>
- Kaufman, Y. 1984. Atmospheric effect on spatial resolution of Surface imagery. *Applied Optics*, 23(19), 3400-3408. <https://doi.org/10.1364/AO.23.003400>

- Liu, J.G. 2000. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details. *International Journal of Remote Sensing*, 21(18), 3461-3472. <https://doi.org/10.1080/014311600750037499>
- Marini, A., Reina Barragan, F.J., Crippa, G., Harnisch, B., Fuente, I., Lopez, M., Cabeza, I., Zorita, D. 2014. SEOSAT/INGENIO – A Spanish High-spatial-resolution optical mission. *International Conference on Space Optics*. Tenerife, Spain, 7-10 octubre.
- Mekler, Y., Kaufman, Y. 1982. Contrast reduction by the atmosphere and retrieval of nonuniform surface reflectance. *Applied Optics*, 21(2), 310-316. <https://doi.org/10.1364/AO.21.000310>
- Otazu, X., González-Audicana, M., Fors, O., Nuñez, J., 2005. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods: Application to wavelet-based methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 43(10), 2376-2385. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.856106>
- Pons, X., Pesquer, L., Cristóbal, J., González-Guerrero, O. 2014. Automatic and improved radiometric correction of Landsat imagery using reference values from MODIS surface reflectance images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 243-254. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.06.002>
- Sola, I., González-Audicana, M., Álvarez-Mozos, J., Torres, J.L. 2014. Synthetic images for evaluating Topographic Correction Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(3), 1799-1810. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2255296>
- Sola, I., González-Audicana, M., Álvarez-Mozos, J. 2015. Validation of a simplified model to generate multispectral synthetic images. *Remote Sensing*, 7(3), 2942-2951. <https://doi.org/10.3390/rs70302942>
- Sun, J., Xu, Z., Shum, H. Y. 2008. Image super-resolution using gradient profile prior. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1-8.
- Vicente-Serrano, S.M., Pérez-Cabello, F., Lasanta, T. 2008. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment* 112(10), 3916-3934. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.011>
- Villa, G., Montoro, M.A. 1993. Ajuste radiométrico conjunto de varias imágenes de satélite para la realización de mosaicos de ortoimágenes. En *Actas de la V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*. Las Palmas de Gran Canaria, España, 10 a 12 de Noviembre, pp. 385-394.
- Villa, G., Moreno, J., Calera, A., Amorós-López, J., Camps-Valls, G., Domenech, E., Garrido, J., González-Matesanz, J., Gómez-Chova, L., Martínez, J. A., Molina, S., Peces, J. J., Plaza, N., Porcuna, A., Tejero, J. A., Valcárcel, N. 2013. Spectro-temporal reflectance surfaces: a new conceptual framework for the integration of remote-sensing data from multiple different sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9-10), 3699-3715. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716910>
- Villa, G., Mas, S., Fernández-Villarino, X., Martínez-Luceño, J., Ojeda, J. C., Pérez-Martín, B., Tejero, J. A., García-González, C., López-Romero, E., Soteres, C. 2016. The need of nested grids for aerial and satellite images and Digital Elevation Models. En *ISPRS Archives of the XXIII Congress International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Praga, República Checa, 12 - 19 Julio 2016. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B2-131-2016>
- Vivone, G., Alparone, L., Chanussot, J., Dalla Mura, M., Garzelli, A., Licciardi, G., Restaino, R., Wald, L. 2015. A Critical Comparison Among Pansharpening Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), 2565-2586. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2361734>
- Wald, L., Ranchin, T., Mangolini, M. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(6), 691-699.
- Zhang, Y., 2004. Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(6), 657-661.
- Zhang, Y., Kumar, R., 2014. From UNB Pansharp to Fuze Go – the success behind the pan-sharpening algorithms. *International Journal of Image and Data Fusion*, 5(1), 39-53. <https://doi.org/10.1080/19479832.2013.848475>
- Zhao, N., Wei, Q., Basarab, A., Kouame, D., Tourneret, J. 2015. Fast single image super-resolution. *CoRR* <https://arxiv.org/abs/1510.00143>
- Zhou, J., Civco, D. L., Silander, J. A. 1998. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), 743-757. <https://doi.org/10.1080/014311698215973>