

CASO PRÁCTICO

Obtención de mapas verdad-terreno de LAI, FAPAR y cobertura vegetal a partir de imágenes del satélite chileno FASat-C y medidas *in-situ* en la zona agrícola de Chimbarongo, Chile, para la validación de productos de satélite.

Latorre, C.^{1,*}, Camacho, F.¹, Mattar, C.², Santamaría-Artigas, A.², Leiva-Büchi, N.², Lacaze, R.³

¹ EOLAB (Earth Observation LABORatory). Parc Científic Universitat de València. Catedrático Agustín Escardino 9, 46980 Paterna, Valencia, España.

² Laboratorio para el Análisis de la Biosfera (LAB), Universidad de Chile. Avda. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile.

³ HYGEOS, Observation de la Terre / Earth Observation Euratechnologies. 165 Avenue de Bretagne 59000 Lille, France.

Resumen: El proceso de validación es fundamental en teledetección para garantizar la calidad de los productos obtenidos a partir de las observaciones de satélite. En el caso concreto de productos de vegetación, es necesario disponer de datos verdad-terreno de diferentes tipos de ecosistemas, y desarrollar estrategias de muestreo y escalado que permitan la caracterización de la superficie y la correcta relación del tamaño de pixel que se desea validar. En este caso práctico, se presenta la metodología aplicada en el contexto del proyecto FP7 ImagineS (*Implementing Multi-scale Agricultural Indicators Exploiting Sentinels*) para la validación a partir de datos *in-situ* de los productos globales de LAI, FAPAR y cobertura vegetal. Estos productos se generan de forma operativa a 1 km de resolución espacial y 10 días de frecuencia temporal a partir de las observaciones de PROBA-V en la componente global del servicio europeo Copernicus de superficie terrestre (*Copernicus Global Land Service*). En particular, se presentan los resultados de la campaña de campo realizada en enero de 2015 en la zona agrícola de Chimbarongo, Chile, donde se aplica la metodología de escalado de datos de campo y generación de mapas verdad-terreno a partir de las observaciones del satélite chileno FASat-C de 5,8 m de resolución espacial, y utilizando técnicas de regresión multivariada por mínimos cuadrados. Finalmente, se ha aplicado el método a una imagen Landsat-8 de 30 m de resolución para analizar la influencia de la imagen en los mapas verdad-terreno utilizados para validar. Los resultados demuestran la fiabilidad de la metodología empleada, y la consistencia del método respecto a la imagen de alta resolución utilizada, obteniéndose un menor RMSE en los mapas generados a partir de FASat-C de mayor resolución espacial. Los mapas verdad-terreno se han comparado con los productos generados a partir de PROBA-V a 1 km en *Copernicus Global Land* y con el producto de MODIS también de 1 km, mostrando PROBA-V muy buen acuerdo en la zona de estudio, mientras que MODIS presenta un *bias* negativo respecto a los mapas verdad-terreno en la zona de estudio.

Palabras clave: FASat-C, parámetros biofísicos, campaña de campo, validación, Copernicus.

LAI, FAPAR and FCOVER ground-truth map creation from FASat-C satellite imagery and *in-situ* measurements in Chimbarongo, Chile, for satellite products validation

Abstract: In remote sensing, validation exercises are essential to ensure the quality of the products originated from satellite Earth observations. To assess the measurement uncertainty derived from satellite products, several ground field data from different ecosystems must be available for use. In the same order of importance, it is necessary to

* Autor para la correspondencia: konsuelo.latorre@gmail.com

define data sampling and up-scaling methodologies to allow a suitable comparison between the ground data and the pixel size of the product. This paper shows the applied methodology used in the FP7 ImagineS project (Implementing Multi-scale Agricultural Indicators Exploiting Sentinels) to validate 10-days global LAI, FAPAR and vegetation cover products at 1 km spatial resolution using in-situ data. These global products are derived from PROBA-V observations in the Copernicus Global Land Service. In particular, this case study shows the results of the field-campaign carried out in January of 2015 in the agricultural area of Chimbarongo, Chile. The methodology to scale the ground data and to create ground-based maps using FASat-C Chilean satellite imagery with a 5,8 m spatial resolution using multivariate least squares regression is shown. Finally, the same methodology was used with a 30 m spatial resolution Landsat-8 image to analyze the effect of the field-data input on the ground-truth maps used to validate the results. Our results show the reliability on the presented methodology and the consistency of the method with regard to the input data. Better results and lower RMSE errors were obtained using FASat-C data. The comparison with satellite products at 1 km shows a good agreement with Copernicus Global Land products derived from PROBA-V observations, and systematic negative bias for the MODIS products.

Key words: FASat-C, biophysical parameters, field campaign, validation, Copernicus.

1. Introducción

El servicio global de la superficie terrestre de Copernicus (*Copernicus Global Land Service*) a través de su portal web (<http://land.copernicus.eu/global/>), distribuye de forma operativa un conjunto de variables geo-biofísicas obtenidas a partir de datos de satélites europeos que describen el estado de la vegetación, el balance energético en la superficie continental y el ciclo del agua a escala global con una resolución espacial típica de 1 km. Entre ellas, distribuye variables climáticas esenciales como el índice de área foliar (*Leaf Area Index*, LAI), o la fracción de radiación fotosintéticamente activa (0,4-0,7 μm) que es absorbida por la vegetación (*Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*, FAPAR), así como otras variables como la fracción de cobertura vegetal (FCOVER). Todas ellas de gran utilidad en la monitorización de la vegetación, el ciclo del carbono, o la modelización climática.

La validación de los productos derivados por teledetección es obligatoria para determinar las incertidumbres (aleatorias y sistemáticas) asociadas a las estimaciones y evaluar en qué medida los productos cumplen con los requisitos del usuario (Chander *et al.*, 2013). En el contexto del subgrupo de validación de productos de superficie (*Land Product Validation*, LPV) del comité de satélites de observación de la Tierra (*Committee on Earth Observation Satellites*, CEOS), se han desarrollado, a partir de diferentes esfuerzos de validación (Garrigues *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2009; Camacho *et al.*, 2013), recomendaciones de

buenas prácticas para la validación de los productos globales de LAI (Fernandes *et al.*, 2014), las cuales se aplican regularmente para validar los productos de vegetación generados en *Copernicus Global Land* (Camacho *et al.*, 2016). En este contexto, el enfoque de validación genérico tiene dos componentes principales, la inter-comparación de productos (validación indirecta) y la validación con datos *in-situ* (validación directa).

La comparación de productos permite evaluar la consistencia espacial y temporal y las incertidumbres asociadas sobre una gran variedad de situaciones ya que no requiere de datos *in-situ*, si bien no constituye una validación propiamente dicha ya que evalúa discrepancias en términos relativos.

La validación directa consiste en evaluar la incertidumbre asociada al producto de satélite mediante comparación con medidas verdad-terreno. Sin embargo, en el caso de sensores de baja y media resolución, esta comparación no es directa, dada la variabilidad natural de las superficies y la diferencia tan grande de resolución que existe entre las mediciones sobre el terreno, con sensores de campo, y las observaciones del satélite a resoluciones kilométricas. El estado del arte de la validación directa, adoptado como estándar de buenas prácticas en el CEOS LPV (Fernandes *et al.*, 2014), consiste en realizar el escalado de los datos de campo utilizando para ello una imagen de alta resolución (aproximadamente 20 m), que posteriormente se agrega a la resolución espacial del producto que se desea validar (Morissette *et al.*,

2006). Esta metodología fue implementada y optimizada durante el proyecto VALERI (*Validation of Land European Remote sensing Instrument*) (<http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>) para la validación de productos de satélite. Básicamente, se define un número moderado (entre 30 y 50) de unidades elementales de muestreo (*Elementary Sampling Units*, ESU) que se distribuyen generalmente por clases o tipos de vegetación presentes en una zona de estudio típicamente de 3×3 km. Posteriormente, se utilizan métodos de regresión robusta para determinar una función empírica de transferencia que establece la relación entre las medidas *in-situ* de cada ESU y la información multi-espectral de la imagen de satélite (Martínez *et al.*, 2009). Para realizar la validación directa de productos globales es necesario disponer de un conjunto de zonas de validación representativo de los distintos ecosistemas y de su fenología.

Actualmente, en el contexto del proyecto FP7-ImagineS (*Implementing Multi-scale Agricultural Exploiting Sentinels*), que da apoyo de investigación al servicio *Copernicus Global Land*, se ha establecido una red de zonas piloto para validar y evaluar los productos de satélite que proporciona *Copernicus Global Land* (Camacho *et al.*, 2014) en diversos grupos de investigación a escala global. Uno de estos sitios es Chimbarongo (San Fernando, Chile), parte de la red LAB-net (Mattar *et al.*, 2016), ya que cumple requisitos como extensión, homogeneidad en usos de suelo, accesibilidad, etc., para ser considerado como zona de validación del proyecto.

- El objetivo principal de este caso práctico consiste en la obtención de los mapas verdad-terreno del LAI, FAPAR y cobertura vegetal en la zona agrícola de Chimbarongo a partir de las medidas *in-situ* y los datos del satélite chileno, Sistema Satelital de Observación Terrestre (SSOT), también conocido como FASat-Charlie (FASat-C).
- Como objetivos secundarios, se propone evaluar la representatividad del muestreo realizado a partir de un procedimiento del método de la envolvente convexa o Convex Hull y a partir del método de Monte-Carlo que relaciona la frecuencia acumulada de la distribución de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) sobre las ESUs medidas con 200 patrones de muestreo aleatorio. Finalmente, se evaluará la influencia de la imagen de satélite utilizada para el escalado de los datos de campo mediante la comparativa

de los resultados obtenidos con el FASat-C y con Landsat-8.

La sección 2 presenta la caracterización de la zona de estudio. La sección 3 describe las características de las imágenes de satélite utilizadas. La sección 4 presenta los principales resultados, incluyendo el análisis del muestreo, la función de transferencia (FT), y los mapas obtenidos. Finalmente, las conclusiones se presentan en la sección 5.

2. Caracterización de la zona

La campaña de campo se efectuó durante los días 19 y 20 de enero de 2015 y se llevó a cabo por parte de investigadores del Laboratorio de Observación de la Tierra (EOLAB) (www.eolab.es) e investigadores del Laboratorio para el Análisis de la Biosfera de la Universidad de Chile que facilitaron los permisos para el acceso a la zona de estudio (http://biosfera.uchile.cl/ln_chimbarongo.html).

2.1. Zona de estudio

La zona agrícola de Chimbarongo se encuentra junto a la ciudad de San Fernando, capital de la provincia de Colchagua en el centro de Chile y segundo centro urbano más poblado de la Región de O'Higgins (latitud 34,7081° S, longitud 70,9948° O). Se ubica a 160 km al norte de la ciudad capital de Santiago.

El lugar de estudio engloba una meseta de cultivos anuales sobre un área aproximada de 10 km² situada a 320 m de altitud en un valle fértil cerca del río Tinguiririca, a 12 km desde el embalse Convento Viejo y la ciudad de Chimbarongo. Tiene un clima mediterráneo con el tipo de estación seca, con una precipitación anual de 701 mm, una radiación solar media cercana a 206 Wm⁻², y un máximo, media y temperatura mínima de 20,8°C, 6,6°C y 13,1°C, respectivamente. Este área se utiliza principalmente para la agricultura y los cultivos predominantes como maíz, tabaco, frambuesa, habas, huertos frutales (ciruelas y manzanas) y viñedos. La alta heterogeneidad de la agricultura hace que sea interesante como zona de prueba donde se han realizado varios estudios, relacionados con la evaluación de los métodos de estimación de la evapotranspiración real (Mattar *et al.* 2014, Olivera-Guerra *et al.* 2014), la evapotranspiración de partición (Olivera-Guerra *et al.* 2015) o la

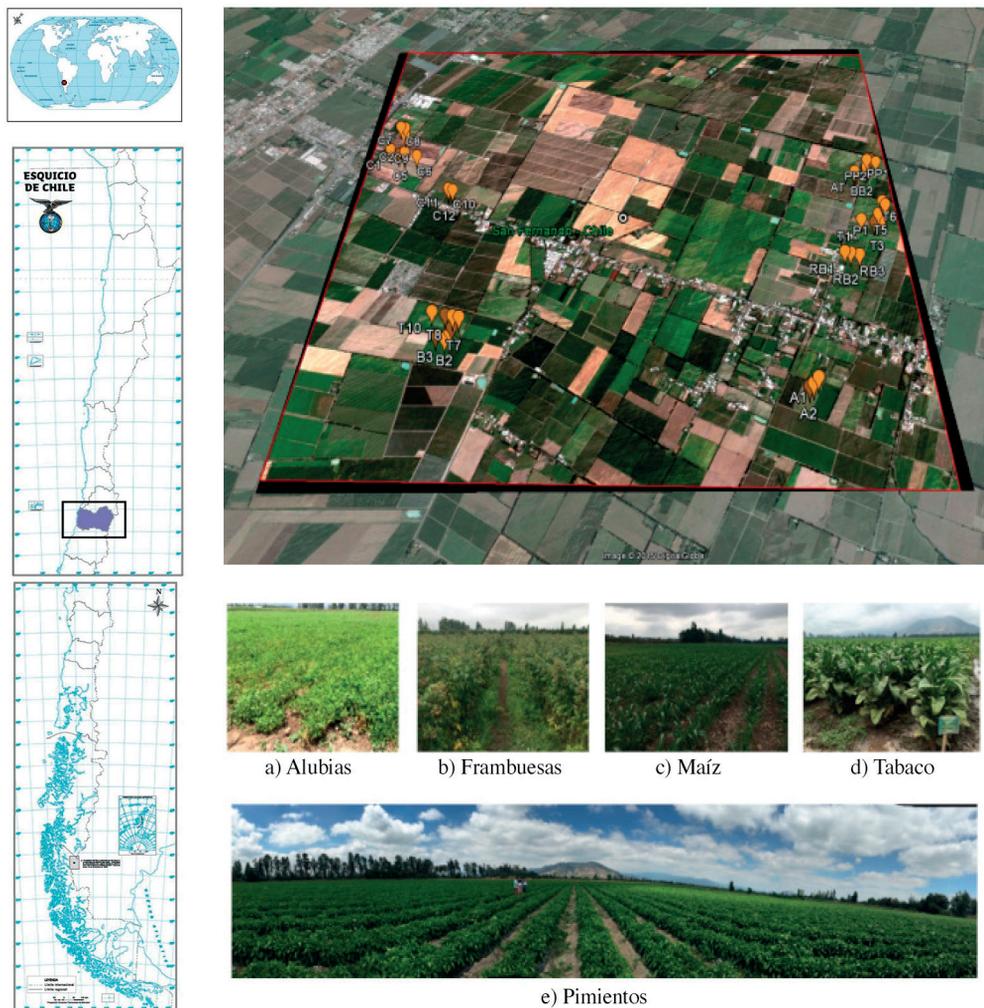


Figura 1. Izquierda: Ubicación de la zona de estudio (cartografía del Instituto Geográfico Militar de Chile). Derecha arriba: localización del muestreo en la imagen 5×5 km TOA de FASat-C, GoogleEarth. Derecha abajo: Diferentes tipos de cobertura.

validación de productos de vegetación derivados a partir de imágenes de satélite Sentinel (Latorre et al., 2015). En la zona de estudio, hay una estación LABnet instalada sobre un sitio de cultivo de frambuesa (34°43'39,67" S; 70°58'46,16" W). Los suelos pertenecen al orden Inceptisol, con una textura predominantemente arenosa (arena=55,0%; limo=30,0%; arcilla=10,6%), una profundidad del suelo de ~85 cm. Se han clasificado como parte de las series de suelos "Limanque" (CIREN, 2002), que con frecuencia muestran un alto contenido de materia orgánica, gravas y clastos. La estación LABnet está configurada para almacenar un promedio de 5 minutos de las

siguientes variables: humedad del suelo a 0,07 M y 0,2 M (Campbell CS650 y CS616 Científica); temperatura del suelo a 0,07 M y 0,2 M (Campbell Scientific CS650 y 109); flujo de calor del suelo (Huskeflux HFP01SC); temperatura radiométrica de superficie (Apogee SI-111); temperatura del aire y humedad relativa a 2 m (Vaisala HMP60); radiación solar (LICOR LI-200x); radiación neta (Kipp & Zonen NR-Lite2); precipitación (Texas Electrónica TE525MM); y velocidad y dirección del viento (R. M. Joven 3002).

La Figura 1 muestra una imagen de la zona de estudio con ejemplos de los cultivos presentes.

2.2. Instrumentación y procesado de datos

Las variables biofísicas de las medidas se derivaron a partir de la técnica indirecta no destructiva de la fotografía digital hemisférica (*Digital Hemispherical Photos*, DHP) (Weiss *et al.* 2004), basada en la medida de la fracción de huecos de la cubierta (*gap fraction*). Para ello se utilizó una cámara CANON EOS 6D y la lente ojo de pez SIGMA 8mm F3.5-EX DG.

El sistema se calibró mediante un banco óptico, con el fin de obtener el centro óptico y la función de magnificación de la lente. La Figura 2 describe los resultados de la calibración cuyo centro óptico se obtuvo para el pixel $x=896$, $y=1378$ (Latorre *et al.*, 2014).

La Figura 3 muestra un ejemplo de varias adquisiciones, con la cámara orientada hacia abajo (cubiertas de baja altura) o hacia arriba (cubiertas arbóreas).

Las fotografías hemisféricas fueron procesadas mediante el software CAN-EYE versión 6.4 (<https://www6.paca.inra.fr/can-eye>) desarrollado por INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*). A partir de la fracción de huecos o *gap fraction* (P_0) en función del ángulo cenital, se estimó el LAI efectivo y el LAI, relacionándolo

directamente con el factor de agrupamiento o *clumping* (Ecuación 1). Considerando hojas infinitamente pequeñas y distribuidas espacialmente de forma aleatoria, la *gap fraction* se puede aproximar invirtiendo directamente el modelo de Poisson (Ecuación 2), donde $G(\theta_v, \varphi_v)$ determina la orientación de las hojas.

$$LAI_{eff} = \lambda_0 \cdot LAI \quad (1)$$

$$P_0(\theta_v, \varphi_v) = e^{-N \cdot G(\theta_v, \varphi_v)} = e^{-G(\theta_v, \varphi_v) \frac{LAI_{eff}}{\cos(\theta_v)}} \quad (2)$$

La fracción de cobertura vegetal (FCOVER) se estimó a partir de la *gap fraction* en un ángulo entre $0-10^\circ$ según la siguiente expresión:

$$FCOVER = 1 - P_0 \cdot (0 - 10^\circ) \quad (3)$$

Por último, el FAPAR directo instantáneo “*Black Sky Fapar*” (FAPAR^{BS}) considerado a las 10:00 hora solar local se obtuvo a partir del FIPAR (*Fraction of Intercepted Photosynthetically Active Radiation*) como *1-gap fraction* en la dirección del ángulo solar cenital correspondiente a las 10:00 (Ecuación 4).

$$FAPAR^{BS}(\theta_s) = 1 - P_0 \cdot (\theta_s) \quad (4)$$

CAN-EYE proporciona variables adicionales que se consideraron como el FAPAR diario integrado

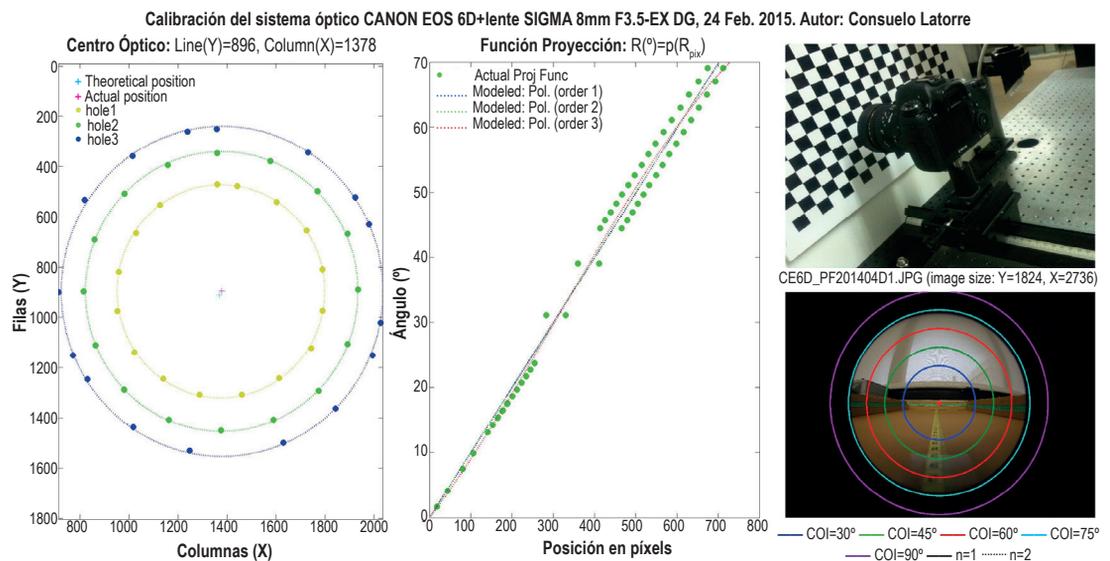


Figura 2. Izquierda: Resultados de la calibración del centro y proyección óptica. Derecha: Sistema y banco óptico (arriba) y distribución de la apertura de campo en la imagen (abajo).

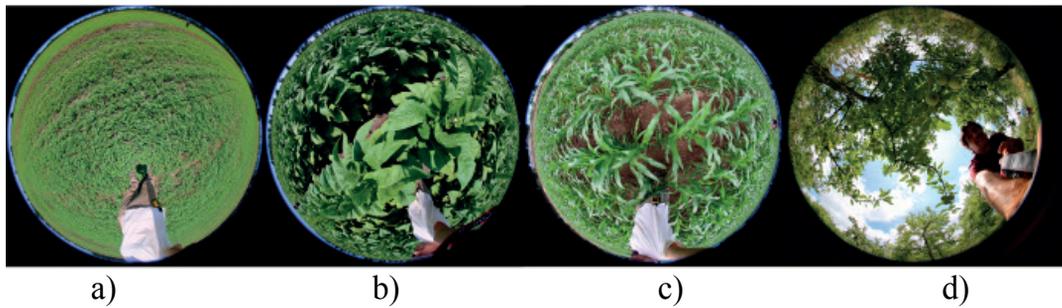


Figura 3. Fotografía hemisférica (DHP). Ejemplos de medidas obtenidas: a) *Alfalfa*, b) *Tabaco*, c) *Maíz*, d) *Manzanos*.

y el FAPAR bajo condiciones de iluminación difusa (o *white sky*).

Además se caracterizó la humedad del suelo o contenido volumétrico de agua en suelo (*Soil Water Content*) mediante el equipo portátil *Handheld TDR HydroSense II* de Campbell Scientific, Inc. Dicho dispositivo presenta una precisión del 3% y un error en el contenido de agua de 0,05% (m^3/m^3).

2.3. Muestreo

El primer reconocimiento de la zona permitió la identificación visual del tipo y estado de los cultivos en la zona de estudio, seleccionando posteriormente aquellas parcelas más representativas donde tomar las medidas. El muestro se realizó siguiendo las recomendaciones para realizar campañas de campo del proyecto en consonancia con la metodología VALERI (Camacho *et al.*, 2015).

Se midieron diez tipos diferentes de cultivos representativos (ej., frambuesa, tabaco, arándanos, maíz, frijol, alfalfa) con el objetivo de cubrir la variabilidad existente en la zona, y se caracterizaron un total de 40 ESUs (de aproximadamente 20×20 m), correspondientes a 20 parcelas y 10 clases de vegetación. Se tomaron en cada ESU de 12 a 15 fotografías hemisféricas, lo que permite estimar con fiabilidad las variables biofísicas de la ESU (Weiss *et al.* 2004). En total se adquirieron alrededor de 491 imágenes hemisféricas.

3. Imágenes de satélite

A continuación se describen las características de la imágenes utilizadas para derivar los mapas verdad-terreno a alta resolución.

3.1. FASat-C

El satélite FASat-C fue puesto en órbita en diciembre de 2011 con el objetivo de monitorizar el territorio chileno. Presenta una órbita heliosíncrona de 620 km de altitud con una frecuencia de paso de 3 a 5 días y un ángulo de visión de $\pm 30^\circ$ (Mattar *et al.* 2014). Dispone de una resolución de 1,45 m en pancromática y 5,8 m en multiespectral (visible y NIR (*Near InfraRed* o Infrarrojo cercano))(Ver Tabla 1). Mediante el sensor NAOMI (*New AstroSat Optical Modular Instrument*) se obtienen alrededor de 100 imágenes diarias de alta resolución, dedicadas a la agricultura de precisión, silvicultura, mapeo de zonas urbanas, biomasa, catástrofes...etc.

3.2. Landsat-8

La NASA cedió el control del satélite Landsat-8 al servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en mayo de 2013, tras cuatro meses desde su lanzamiento. Dispone de un sensor OLI (*Operational Land Imager*) que barre desde el espectro visible al infrarrojo de onda corta SWIR (*Short-Wave InfraRed*) a una resolución de 30 m en multiespectral y 15 m pancromático. Tiene una frecuencia de paso de 16 días (Tabla 1).

La Tabla 1 resume los parámetros más importantes de las imágenes y las bandas seleccionadas de cada sensor para el estudio. En ambos casos se utilizarán imágenes de reflectividad en el techo de la atmósfera.

Tabla 1. Propiedades de las imágenes FASat-C y Landsat-8.

Reflectividad TOA	FASat-C	Landsat-8
Plataforma / Sensor	NAOMI-1	OLI - TIRS
Sistema de Referencia:	UTM 19 Sur, WGS84	WRS2 – 233,84
Resolución Radiométrica:	10 bits	12 bits
Altitud orbital:	620 km	705 km
Periodo orbital:	97 minutos	98,9 minutos
Frecuencia de paso:	38 días Nadir, 3-5 días $\pm 30^\circ$	16 días, 233 ciclos
Barrido nominal :	10 km	180 km
Rango espectral utilizado:	B2 (verde): 0,528 -0,588 μm B3 (rojo): 0,625 -0,695 μm B4 (NIR): 0,758 -0,881 μm	B3 (verde): 0,53 -0,59 μm B4 (rojo): 0,64-0,67 μm B5 (NIR): 0,85 -0,88 μm B6(SWIR1): 1,58 -1,65 μm
Inclinación orbital:	97,8°	98,2°
Resolución espacial pancromática:	1,45 m	15 m
Resolución espacial multispectral	5,8 m	30 m
Fecha de adquisición	2015.01.18	2015.01.12

4. Resultados y discusión

4.1. Medidas *in-situ* de LAI, FAPAR y FCOVER

La Figura 4 detalla un ejemplo de las medidas estimadas de LAI para cada ESU en función de los tipos de cultivo, siendo los más frecuentes los de tabaco y maíz. Además se presentan los histogramas de valores de LAI, FAPAR y FCOVER, mostrando una variabilidad entre 0,5 y 6 para LAI y en todo el rango físico para FAPAR y FCOVER, excepto para valores menores que 0,1. La ausencia de medidas con valores más bajo ha sido

solventada gracias a la localización adicional de medidas de unidades de suelo desnudo, usadas a su vez como puntos de control.

4.2. Evaluación del muestreo

La estrategia de muestreo se evaluó mediante dos métodos:

- Un procedimiento de Monte-Carlo que relaciona la frecuencia acumulada de la distribución de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) sobre las ESUs con 200 patrones de muestreo aleatorio. El resultado (Figura 5, izquierda) muestra que la distribución del muestreo de

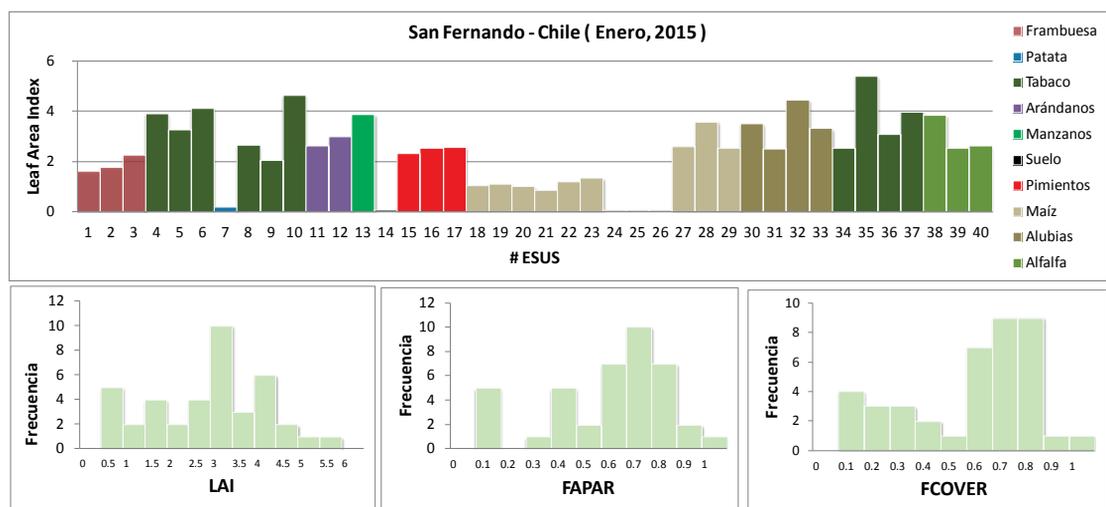


Figura 4. Valores estimados de LAI para cada ESUs por tipo de cultivo (arriba). Histogramas de las medidas obtenidas para LAI, FAPAR y FCOVER (abajo).

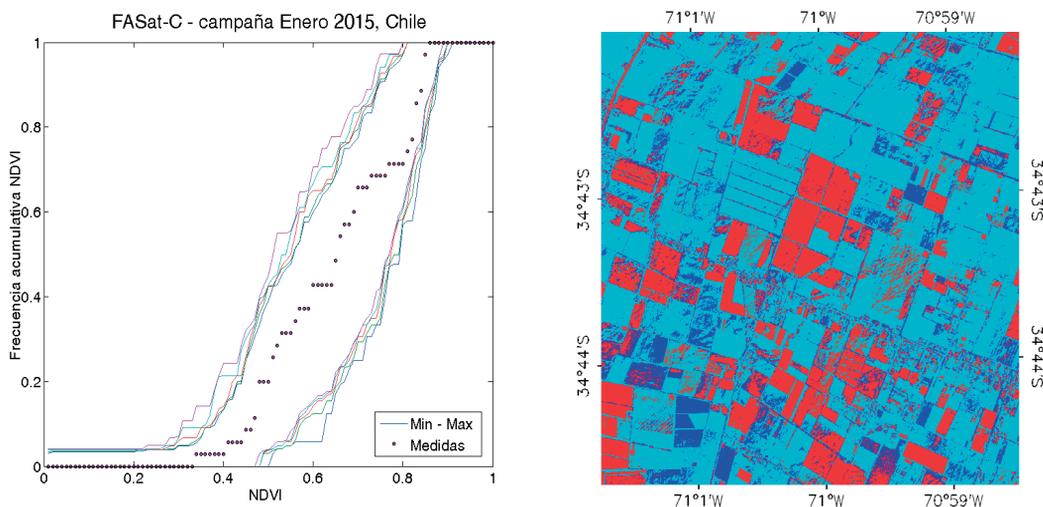


Figura 5. Evaluación del muestreo realizado en el área de estudio (5×5 km). Izquierda: distribución acumulada del NDVI del muestreo (puntos), junto a las distribuciones mínimas y máxima de 200 muestreos aleatorios sobre la zona de estudio. Derecha: mapa de calidad asociado a la función de transferencia (*Convex Hull*) sobre la imagen FASat-C (azul claro interpolación estricta, azul oscuro cercano a interpolación con variaciones de reflectividad $\pm 5\%$ y rojo extrapolación).

campo (puntos) está acotada entre las distribuciones aleatorias máximas y mínimas, prácticamente equidistante a los valores máximos y mínimos (excepto para valores muy altos). Dicho comportamiento indica que el muestreo realizado es adecuado y no presenta sesgos hacia valores bajos o altos de NDVI.

- El método de la envolvente convexa o *Convex Hull* (Barber *et al.*, 1986). Este método ha demostrado su utilidad en el campo de la teledetección en aplicaciones relacionadas con la normalización de espectros, definición de regiones de vegetación en procesos de clasificación y búsquedas de píxeles dentro de una imagen (Ifarraguerri y Chang, 1999; García-Haro *et al.*, 2005; Cernicharo *et al.*, 2010). A partir del método de envolvente convexa se generó un mapa de calidad (*Quality Flag*), relacionado con la capacidad de interpolación de la FT empírica en la zona de estudio, siguiendo la metodología descrita en Martínez *et al.*, (2009). Se definen tres niveles: interpolación estricta (i.e., dentro de la envolvente convexa), cercano a interpolación (i.e., se permiten variaciones de 5% de reflectividad respecto a la envolvente convexa) y extrapolación (i.e., fuera de la envolvente convexa). La Figura 5 (derecha) muestra los resultados para el área de estudio (5×5 km), donde se obtiene un 77% de estimaciones donde la FT se

comporta como interpolador (azul claro) o cercano a interpolador (azul oscuro). El color rojo representa los píxeles donde la FT se comporta como un extrapolador y por tanto tiene menor fiabilidad.

Al calibrarse la función empírica con un muestreo concreto para una fecha y unos tipos de cultivo, la generalización de la misma se puede extrapolar a zonas similares con idénticas condiciones de iluminación.

4.3. Función de Transferencia (FT)

Se probaron diferentes técnicas de regresión seleccionándose la técnica recursiva por mínimos cuadrados multivariada OLS (*Ordinary Least Squares*) que utiliza el algoritmo iterativo IRLS (*Iteratively Re-weighted Least Squares*) (Martínez *et al.*, 2009). Este método ha sido seleccionado para la implementación de las funciones de transferencia que permiten generar los mapas de variables biofísicas a partir de los datos de campo y las imágenes de satélite.

Para evaluar el rendimiento del modelo y seleccionar la combinación de bandas óptima para la FT, se consideran tres indicadores: El error cuadrático medio (RMSE), el error cuadrático

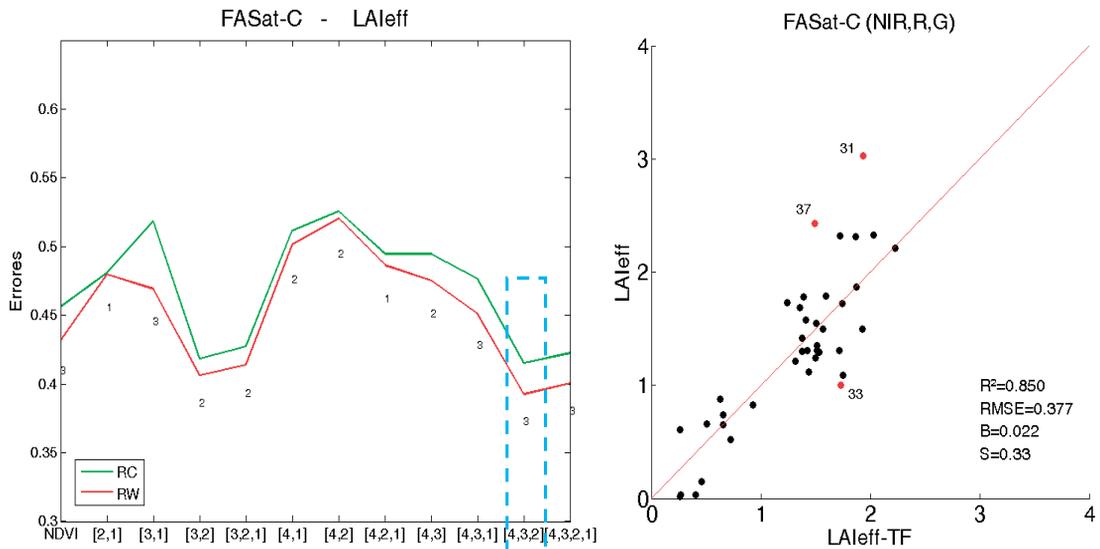


Figura 6. Izquierda: Resultados de la función de transferencia para LAI efectivo sobre FASat-C. Test de múltiples resultados de regresión (bandas 1: Azul, 2: Verde, 3: Rojo, 4: NIR) atendiendo a los errores (RC: RMSE de validación cruzada, RW: RMSE ponderado). Derecha diagrama de dispersión entre los datos de campo (eje y) y la combinación escogida para FASat-C (eje x). Los puntos negros tienen un peso de 1 y los rojos están ponderados a 0,7 (ESUs 31y 33-Alubias y 37-Ta-baco).

medio ponderado (RW) y el error cuadrático medio de validación cruzada (RC). El RMSE y el RW proporcionan una estimación del error medio del modelo para todas las observaciones. Por otra parte, RC proporciona una estimación del rendimiento del modelo ya que proporciona una indicación de lo bien que la función de transferencia predice una observación que no se utiliza para derivar la misma (Cawley y Talbot, 2003; Martínez *et al.*, 2009). La Figura 6 (izquierda) muestra el valor de RC y RW para todas las combinaciones de bandas, siendo la combinación óptima la formada por las bandas NIR-Rojo-Verde, ya que presenta los menores errores para FASat-C. Una vez elegida la FT, es necesario evaluar la relación entre los datos de campo y los valores que proporciona la FT seleccionada. Para ello, se analiza el diagrama de dispersión, el coeficiente de determinación (R^2), el RMSE y el *bias*. La Figura 6 (derecha) expone los resultados obtenidos para la combinación de bandas seleccionada (NIR-Rojo-Verde), con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,85 y un *bias* muy próximo a cero. Los puntos rojos son ponderados con un peso de 0,7 en la función de transferencia.

4.4. Mapas de alta resolución FASat-C

A partir de la FT seleccionada, que relaciona la información *in-situ* con el valor de las reflectividades de las bandas seleccionadas, se han derivado los mapas de extensión espacial de alta resolución (Latorre *et al.*, 2015). La Figura 7 muestra los mapas derivados de la imagen FASat-C sobre la zona de estudio de 5×5 km, donde se puede apreciar con mucho detalle la distribución espacial de las variables biofísicas en la zona de estudio.

4.5. Comparación entre mapas derivados de las imágenes de satélite FASat-C y Landsat 8

Con el propósito de evaluar la influencia de las imágenes de satélite en la extensión espacial de los datos de campo y analizar la robustez del método y las incertidumbres asociadas a los mapas utilizados para validar, se ha repetido el procedimiento utilizando como entrada imágenes Landsat-8 (Tabla 1). Posteriormente, se ha realizado una comparativa entre los diferentes mapas de alta resolución verdad-terreno. Los mapas de FASat-C se reproyectaron a la resolución de Landsat-8 (30 m), y se han evaluado las

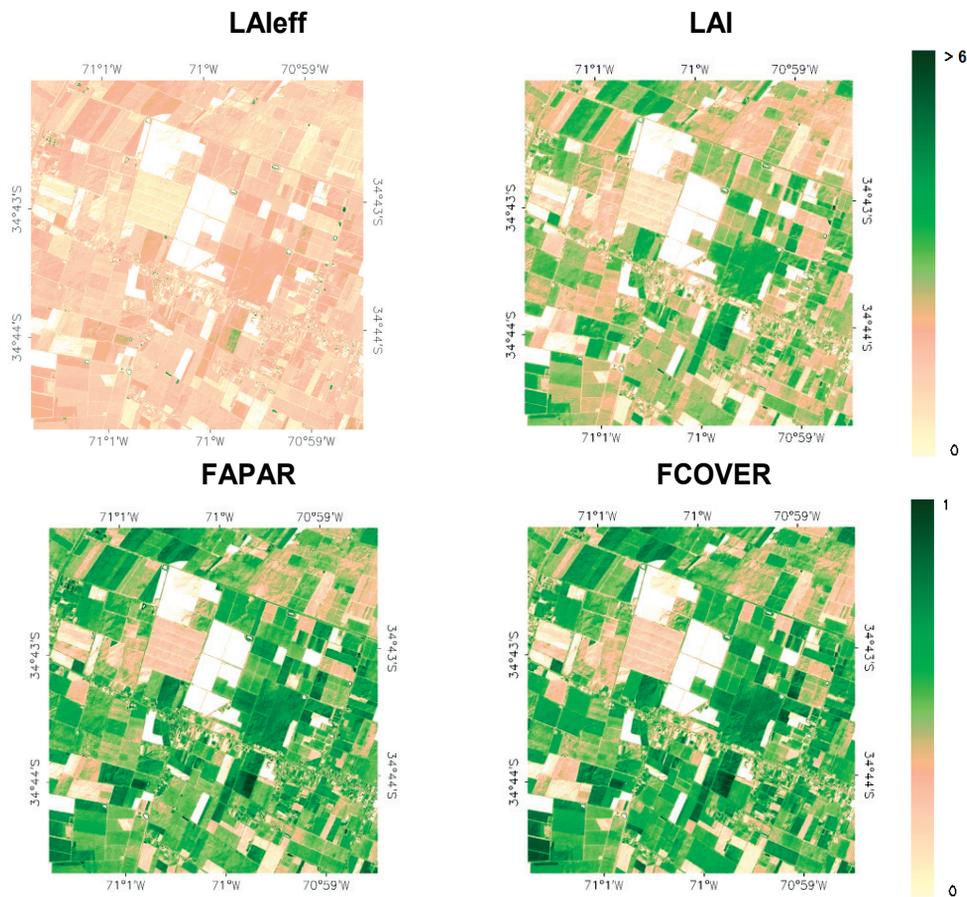


Figura 7. Mapas derivados de la imagen FASat-C sobre la zona de estudio de 5x5 km.

diferencias entre ambos mapas. La Figura 8 muestra un ejemplo de las diferencias obtenidas para el LAIeff (FASat-C - Landsat-8), donde se obtuvo un porcentaje superior al 68% con una diferencia entre los dos mapas de LAIeff inferior a $\pm 0,5$ (en

gris), que es la incertidumbre requerida para productos globales de LAI (GCOS, 2011). El RMSE asociado a los mapas derivadas con Landsat-8 es ligeramente superior al que se obtuvo con FASat-C para todas las variables (Tabla 2), lo que

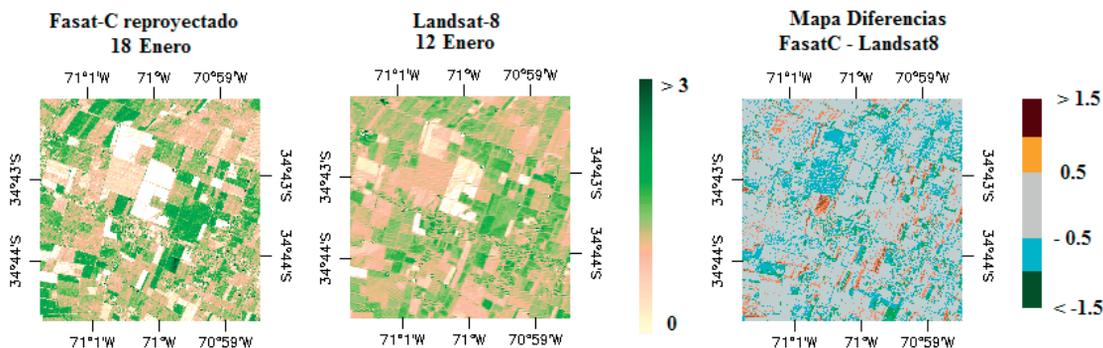


Figura 8. Mapas 5x5 km LAIeff (FASat-C reprojectado a 30 m, Landsat-8 y mapa diferencia).

Tabla 2. Resultados del procesado para las imágenes FASat-C y Landsat-8.

Resultados	Media 3×3 km		Diferencias Fasat-C - Landsat-8	RMSE	
	FASat - C	Landsat - 8		FASat - C	Landsat - 8
Campaña					
LAI _{eff}	1,01	1,16	0,15 - 13%	0,38	0,52
LAI	1,96	2,14	0,18 - 8%	0,76	0,99
FAPAR	0,43	0,51	0,08 - 15%	0,11	0,17
FCOVER	0,44	0,54	0,11 - 19%	0,13	0,16

puede atribuirse a la mejor resolución espacial de FASat-C que permite una mejor correlación entre la reflectividad del pixel y la variable medida en el campo (área ~ 20×20 m). La mayor proximidad temporal de la imagen FASat-C a las adquisiciones de campo podría contribuir también al menor error obtenido en los mapas empíricos.

Las medias realizadas sobre un área de 3×3 km utilizada para validar los productos de satélite de 1 km, muestran que los valores de referencia obtenidos a partir de Landsat-8 son ligeramente superiores (Tabla 2), entre un 8% para el LAI y un 19% para el FCOVER. En valores absolutos las diferencias son inferiores a 0,2 para el LAI (0,15 para LAI eff), y alrededor de 0,1 para FAPAR y FCOVER. Se puede justificar el valor levemente superior de los mapas correspondientes a la imagen Landsat-8 por la diferencia en la fecha de adquisición de las imágenes de satélite (Tabla 1). Se ha comprobado que algunas parcelas fueron

segadas en los días posteriores a la toma de la imagen Landsat-8 y anteriores a la campaña de campo. También por el ligero sesgo obtenido para valores de suelo desnudo a partir de Landsat-8 (ver Figura 9).

Finalmente, se ha analizado también la consistencia entre los mapas derivados de LAI y FAPAR a partir de cada sensor, a partir de un diagrama de dispersión donde la densidad de puntos en el diagrama se representa con una escala de color (Figura 9). Se pone de manifiesto que los mapas derivados con FASat-C presentan menor dispersión que la obtenida para Landsat-8, como consecuencia de la menor incertidumbre asociada a los mapas FASat-C. Se observa que para valores muy bajos de LAI (0-0,1) el FAPAR presenta valores hasta 0,2 en Landsat-8, lo que indica una posible sobreestimación del FAPAR para valores de suelo desnudo (o viceversa).

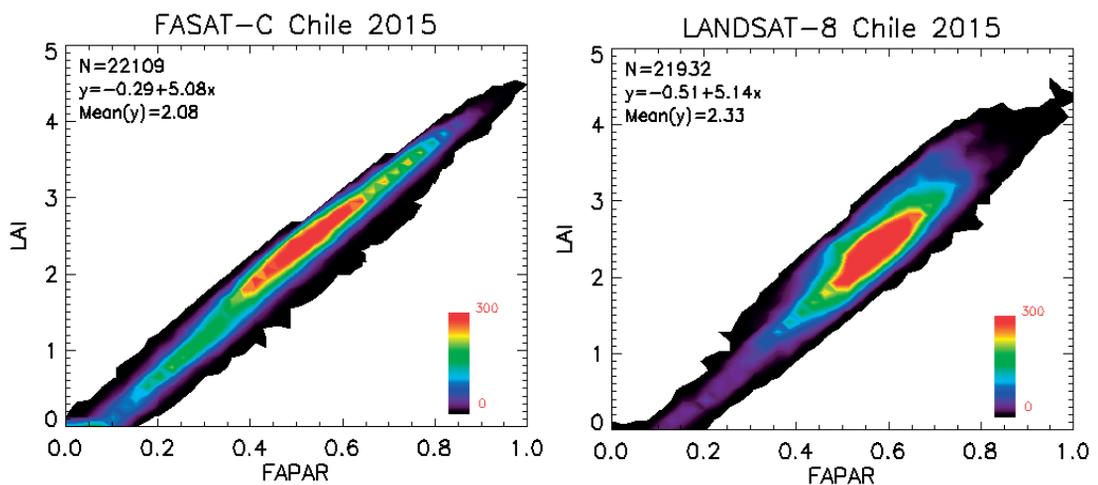


Figura 9. Inter-comparación entre mapas FAPAR vs LAI derivados de las dos imágenes de satélite. Izquierda: FASat-C. Derecha: Landsat-8.

Por último, los diferentes valores estimados para un área de 3×3 km fueron comparados con los valores de los productos globales de baja resolución (1 km) generados en el programa *Copernicus Global Land Service* con datos PROBA-V y en NASA con datos MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). La figura 10 muestra el perfil temporal para LAI durante el periodo 2014-2015. Los valores estimados por los productos globales son muy consistentes con los calculados a partir de los mapas verdad-terreno, especialmente en el producto estimado con datos PROBA-V, mientras que MODIS presenta un *bias* negativo para el área de estudio. Los resultados ponen de manifiesto una mayor exactitud de los productos *Copernicus Global Land* obtenidos a partir de PROBA-V con 1 km de resolución espacial en comparación con MODIS para zonas agrícolas, en sintonía con los resultados de Camacho *et al.* (2016), aunque utilizando un conjunto mayor de zonas de validación.

5. Conclusiones

Este trabajo se enmarca dentro de las actividades del proyecto FP7 ImagineS, para dar soporte a la validación de los productos del servicio europeo Copernicus de superficie terrestre (*Global Land*). En este contexto, se realizó una campaña de campo en zona de cultivo de Chimbarongo, en Chile, en enero de 2015. La campaña de campo se ha realizado siguiendo una estrategia similar a la del proyecto VALERI. Las medidas de campo se han realizado con el método DHP y se han caracterizado 40 unidades de medidas de los cultivos más representativos. Los datos de campo se han extendido espacialmente, utilizando como imagen de alta resolución la adquirida por el

satélite chileno FASat-C y métodos de regresión robusta, tal y como recomienda la CEOS-LPV para la validación de productos de satélite. Se han evaluado diferentes funciones de transferencia empíricas, encontrando que la combinación de bandas NIR-Rojo-Verde es la que presentaba menor error cuadrático medio ponderado y de validación cruzada.

La consistencia del método en función de la imagen utilizada se ha evaluado aplicando el mismo procedimiento pero con una imagen Landsat-8. Los resultados son similares, pero en el caso de Landsat-8 se ha obtenido mayor RMSE para todas las variables (especialmente FAPAR y FCOVER). Tanto la resolución espacial, aproximadamente cinco veces mayor a la de Landsat-8, como la cercanía temporal con la toma de datos justifican la mejora de FASat-C frente a Landsat-8.

Finalmente, es necesario destacar que los resultados obtenidos evidencian una gran consistencia entre FASat-C y Landsat-8, reafirmando la robustez de los protocolos y métodos utilizados para la extensión espacial (*up-scaling*) de los datos de campo para la validación de productos de satélite de baja resolución espacial. En particular, la comparación con los productos de LAI de *Copernicus Global Land* obtenidos con PROBA-V y el producto de LAI de MODIS, ha demostrado un buen acuerdo PROBA-V y una subestimación significativa para MODIS.

Los mapas biofísicos generados junto con las medidas *in-situ* forman parte de la base de datos del proyecto FP7 ImagineS de libre distribución a través de su portal: <http://www.fp7-imagines.eu>.

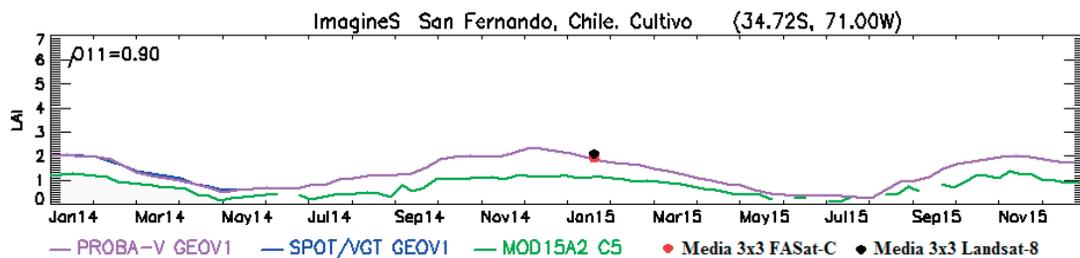


Figura 10. Ejemplo de perfil para el LAI de PROBA-V y MODIS resolución 1 km, evaluados para el dato de campo calculado con las dos imágenes sobre un área de 3×3 km.

6. Agradecimientos

Este estudio está financiado por el proyecto FP7 ImagineS n° 311766 de la Comunidad Europea. La organización de la campaña de campo, junto a la adquisición de las imágenes del sistema satelital chileno FASat-C ha sido posible gracias al Laboratorio para el Análisis de la Biosfera de la Universidad de Chile (LAB), en el marco del proyecto Fondecyt Iniciación n°11130359 y la Fuerza Aérea de Chile (FACH) a través del Grupo de Operaciones Espaciales (GOE). Las imágenes Landsat-8 de alta resolución han sido proporcionadas por el servicio EarthExplorer de USGS y la NASA.

Referencias

- Barber, C.B., Dobkin, C.P., Huhdanpaa, H.T. 1986. The quickhull Algorithm for Convex Hulls, *ACM Transactions on Mathematical software*, 22(4):469-483. <https://doi.org/10.1145/235815.235821>
- Camacho, F., Sánchez, J., Sánchez-Azofeifa, A., Calvo-Rodríguez, S. 2016. Quality Assessment Report. PROBA-V GEOV1: LAI, FAPAR, FCOVER, *Issue 13.10. GIOGLI_QA_GEOV1-PROBAV report*, 122. Disponible en <http://land.copernicus.eu/global> [Último acceso: diciembre de 2016].
- Camacho, F., Baret, F., Lacaze, R. 2015. Guidelines for field campaigns, Issue II.10. Disponible en <http://fp7-imagines.eu/pages/documents.php> [Último acceso: diciembre de 2016].
- Camacho, F., Latorre, C., Lacaze, R., Baret, F., De la Cruz, F., Demarez, V., Di Bella, C., Fang, H., García-Haro, J., Gonzalez, M. P., Kussul, N., López-Baeza, E., Mattar, C., Nestola, E., Pattey, E., Piccard, I., Rudiger, C., Savin, I., Sanchez-Azofeifa, A., Boschetti, M., Bossio, D., Weiss, M., Castrignano, A., Zribi, M. 2014. A Network of Sites for Ground Biophysical Measurements in support of Copernicus Global Land Product Validation. *Proceedings of the IV RAQRS conference*, Torrent, 22-26 September 2014. ISBN: 978-84-370-9808-1
- Camacho, F., Cernicharo, J., Lacaze, R., Baret, F., Weiss, M. 2013. GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 2: Validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*, 137, 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.030>
- Cawley, G.C., Talbot, N.L.C. 2003. Efficient leave-one-out cross validation of kernel fisher discriminant classifiers. *Pattern Recognition*, 36(11), 2585-2592. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(03\)00136-5](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(03)00136-5)
- Cernicharo, J., Camacho, F., Martínez, B., López-Baeza, E. 2010. Estimación del contenido de agua de la vegetación en la zona V.A.S. de validación de SMOS mediante la extensión espacial de medidas de campo con imágenes CHRIS y MODIS. *Revista de teledetección*, 33, 64-79. Disponible en <http://www.aet.org.es/?q=revista33-9> [Último acceso: diciembre de 2016].
- Chander, G., Hewinson, T., Fox, N., Wu, X., Xiong, X., Blackwell, W. 2013. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3), 1056-1080. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2228654>
- CIREN 2002. Estudio Agrológico IX Región. Descripciones de suelos: Materiales y símbolos. N°122, 360 pp.
- Fernandes, R., Plummer, S., Nightingale, J., Baret, F., Camacho, F., Fang, H., Garrigues, S., Gobron, N., Lang, M., Lacaze, R., LeBlanc, S., Meroni, M., Martínez, B., Nilson, T., Pinty, B., Pisek, J., Sonntag, O., Verger, A., Welles, J., Weiss, M., Widlowski, J.L. 2014. Global Leaf Area Index Product Validation Good Practices Version 2.0. in G. Schaepman-Strub, M. Roman, & J. Nickeson (Eds.). *Best Practice for Satellite-Derived Land Product Validation* (p.76): Land Product Validation Subgroup. <http://dx.doi.org/10.5067/doc/ceoswgc/vlpv/lai.002>
- García-Haro, F.J., Sommer, S., Kemper, T. 2005. A new tool for variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA). *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2135-2162. <https://doi.org/10.1080/01431160512331337817>
- Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morisette, J. T., Weiss, M., Nickeson, J. E., *et al.*, 2008a. Validation and Intercomparison of Global Leaf Area Index Products Derived From Remote Sensing Data. *Journal of Geophysical Research*, 113,G02028, <https://doi.org/10.1029/2007JG000635>
- GCOS-154, 2011. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate Supplemental details to the satellite-based component of the Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC - 2011 Update, *WMO, Geneva, Switzerland*
- Ifarraguerri, A., Chang, C.I. 1999. Multispectral and hyperspectral image analysis with convex cones. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2), 756-770. <https://doi.org/10.1109/36.752192>

- Latorre, C., Camacho, F., Mattar, C., Santamaría-Artigas, A., Leiva-Büchi, N., Lacaze, R. 2015. Obtención de mapas de alta resolución de LAI, FAPAR y fracción de cobertura vegetal derivados de imágenes del satélite chileno FASat-C y adquisiciones *in-situ* en la zona agrícola de Chimbarongo, Chile. 2015. *Proceedings en XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET)*, 21 - 23 de Octubre, 2015, Sevilla, España.
- Latorre, C., Camacho, F., Pérez, Beget M.E., Di Bella, C. 2014. Vegetation Field Data and Production of Ground-Based Maps: 25 de Mayo site, La Pampa, Argentina, report. 18-20. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3842.1603>
- Latorre, C., Camacho, F., Mattar, C., Santamaría-Artigas, N., Leiva-Büchi, N. 2015. Vegetation Field Data and Production of Ground-Based Maps: San Fernando site. Chile. Informe técnico. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2400.3684>
- Martínez, B., García-Haro, F. J., Camacho, F. 2009. Derivation of high-resolution leaf area index maps in support of validation activities: Application to the cropland Barrax site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(1), 130-145. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.07.014>
- Mattar, C., Hernández, J., Santamaría-Artigas, A., Durán-Alarcón, C., Olivera-Guerra, L., Izunza, M., Tapia, D., Escobar-Lavín, E. 2014. A first in-flight absolute calibration of the Chilean Earth Observation Satellite. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92: 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.017>
- Mattar, C., Franch, B., Sobrino, J.A., Corbari, Ch., Jiménez-Muñoz, J.C., Olivera-Guerra, L., Skokovic, D., Sòria, G., Oltra-Carrió, R., Julien, Y., Mancini, M. 2014. Impacts of the broad-band albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural. *Remote Sensing of Environment*. 147, 23-42. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.011>
- Mattar, C., Santamaría-Artigas, A., Durán-Alarcón, C., Olivera-Guerra, L., Borvarán, D., Fuster, R. 2016. The LAB-net soil moisture network: application to thermal remote sensing and surface energy balance. *Data*, 1(1), 6. <https://doi.org/10.3390/data1010006>
- Morisette, J.T., Baret, F., Privette, J.L., Myneni, R.B., Nickeson, J.E., Garrigues, S., Shabanov, N.V., Weiss, M., Fernandes, R., Leblanc, S.G. et al., 2006. Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1804-1817. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872529>
- Olivera-Guerra, L., Mattar, C., Galleguillos, M. 2014. Estimation of the Real Evapotranspiration and its variation in Mediterranean landscapes of central-southern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.11.012>
- Olivera-Guerra, L.; Merlin, O.; Mattar, C.; Durán-Alarcón, C.; Santamaría-Artigas, A.; Stefan, V. 2015. Combining meteorological and lysimeter data to evaluate energy and water fluxes over a row crop for remote sensing applications. *Proceedings in International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26-31 July 2015, Milan, Italy. <https://doi.org/10.1109/igarss.2015.7326865>
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I., Coppin, P. 2004. Review of methods for in-situ leaf area index (LAI) determination: part II. Estimation of LAI, errors and sampling, *Agriculture and forest Meteorology*, 121(1-2), 37-53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.001>