

# Influencia del ángulo de observación en la estimación del índice de área foliar (LAI) mediante imágenes PROBA/CHRIS

Delegido, J.<sup>\*1</sup>, Meza, C.M.<sup>2</sup>, Pasqualotto, N.<sup>1</sup>, Moreno, J.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Instituto Universitario de la Paz UNIPAZ, Barrancabermeja, Colombia.

---

**Resumen:** La estimación de variables biofísicas como el Índice de Área Foliar (LAI) mediante técnicas de teledetección es objeto de numerosos estudios, ya que de su conocimiento se puede extraer valiosa información sobre el estado de la vegetación. En este trabajo se estudia la estimación del LAI mediante imágenes multiangulares PROBA/CHRIS, analizando el comportamiento de la reflectividad medida en sus 5 ángulos de observación, en las longitudes de onda de 665 y 705 nm correspondientes a la banda de absorción de la clorofila y la reflectividad de la vegetación en el Red-Edge, respectivamente. El Índice de Diferencia Normalizada (NDI) calculado en estas longitudes de onda, mostró una buena correlación con el LAI, lo que permite su estimación por teledetección y su aplicabilidad a las imágenes del recientemente lanzado Sentinel 2 de la ESA, pues incorpora como novedad varias bandas en el Red-Edge. En esta investigación se analiza la influencia en la geometría de adquisición del NDI calibrando la relación entre este índice y el LAI para cada uno de los 5 ángulos de observación de PROBA/CHRIS. Con ello, se ha obtenido una relación capaz de proporcionar el LAI a partir del ángulo de observación y del índice NDI.

**Palabras clave:** LAI, multiangular, NDI, PROBA/CHRIS, Red-Edge, Sentinel-2.

## Influence of observation angle in leaf area index (LAI) estimation using PROBA/CHRIS images

**Abstract:** The estimation of biophysical variables, such as the Leaf Area Index (LAI), using remote sensing techniques, is still the subject of numerous studies, since these variables allow obtaining valuable information on the vegetation status. In this work, we estimate LAI from multiangular PROBA/CHRIS images, by analyzing the reflectance measured in its 5 observation angles, for the bands centered in 665 and 705 nm. These wavelengths correspond to the chlorophyll absorption band and the Red-Edge region, respectively. The Normalized Difference Index (NDI) calculated from this wavelengths, shows good correlation with LAI and allows its remote sensing estimation and its applicability to the recently launched ESA Sentinel 2, thanks to its new bands in the Red-Edge. This research analyzed the influence on the acquisition geometry in the NDI, calibrating the relationship between this index and the LAI for each of the five observation angles in the PROBA / CHRIS images. As a result, we have obtained a relationship capable of providing LAI from the viewing angle and the NDI index.

**Key words:** LAI, multiangular, NDI, PROBA/CHRIS, Red-Edge, Sentinel-2.

---

\* Autor para la correspondencia: [Jesus.Delegido@uv.es](mailto:Jesus.Delegido@uv.es)

## 1. Introducción

El Índice de Área Foliar (LAI) se define como el área total de una cara de las hojas por unidad de superficie de terreno. Definido inicialmente por Watson (1947), representa la cantidad de material foliar en un ecosistema por unidad de área. El LAI es un parámetro estructural de la vegetación, fundamental para el análisis cuantitativo de muchos procesos físicos y biológicos relacionados con la dinámica de la vegetación y los efectos globales del ciclo del carbono y climáticos (Chen *et al.*, 2002).

La estimación del LAI puede ser de interés en ecología para mejorar nuestro conocimiento en procesos como la fotosíntesis, transpiración, evapotranspiración e intersección de lluvias, y estimar la producción primaria neta (PPN) de ecosistemas terrestres (Bonan, 1993). La variación del LAI puede integrar varias condiciones que afectan el crecimiento y desarrollo vegetativo. El LAI es un parámetro clave usado también en agricultura en estimaciones del rendimiento de los cultivos.

En las últimas décadas ha aumentado sustancialmente el interés por obtener información sobre la distribución y cambio del LAI, dada la capacidad de estimación de esta variable en grandes áreas a partir de datos de satélites. En este sentido, resulta de gran interés la utilización de datos del sensor CHRIS (*Compact High Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo de PROBA (*Project for On-Board Autonomy*) pues es un sensor hiperespectral y multiangular que permite tanto la estimación de variables biofísicas como el LAI así como el estudio del carácter anisotrópico de la reflectividad de la vegetación.

El objetivo del presente trabajo es la estimación del LAI a partir de imágenes multiangulares PROBA/CHRIS. Para ello se aplicará un modelo empírico basado en el Índice de Diferencia Normalizada (NDI), analizando cómo la relación depende del ángulo de observación con el objetivo final de obtener una expresión que nos permita la estimación del LAI a partir del ángulo de observación y del índice NDI. Esta relación puede ser aplicada a las imágenes de numerosos satélites, siendo especialmente interesante su aplicación en el nuevo satélite Sentinel-2 de la ESA, que dispone de las bandas adecuadas para el cálculo del NDI, mejorando además la calidad espacial y radiométrica de otros satélites operativos.

## 2. Método

Debido al interés en el conocimiento del LAI, tanto en ecosistemas naturales como en cultivos, numerosos autores han desarrollado distintos métodos para la estimación de esta variable utilizando técnicas de teledetección. Dichos métodos pueden clasificarse en dos grandes grupos: métodos de inversión y métodos empíricos basados en índices espectrales. Los métodos de inversión se basan en la resolución de un modelo de transferencia radiativa simulando las condiciones de la hoja y la atmósfera, de manera que obtienen la reflectividad en la superficie vegetal con las condiciones introducidas. Invertiendo el modelo se obtienen los parámetros biofísicos de interés (Bacour *et al.*, 2006; Baret y Buis, 2007; Verger, 2008).

Los índices de vegetación son relaciones simples entre la reflectividad en diferentes bandas. Los métodos basados en índices se basan en la relación empírica entre un índice calculado con un determinado sensor y un parámetro biofísico, como el LAI. La mayoría de los índices de vegetación definidos hasta el momento tienen en común el uso de los valores de reflectividad en las zonas espectrales del rojo ( $r$ ) e infrarrojo cercano ( $irc$ ), debido a que la reflectividad de la vegetación pasa de un mínimo relativo en el rojo causado por la absorción de la clorofila, a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano que es consecuencia de las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular (Haboudane *et al.*, 2004).

Entre los índices de vegetación más comúnmente usados en la estimación de parámetros biofísicos por teledetección, destacan, entre otros, el *Ratio Vegetation Index* (RVI) (Pearson y Miller, 1972), el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974), el *Perpendicular Vegetation Index* (PVI) (Richardson y Wiegand, 1977; Gilbert *et al.*, 1997), el *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (Huete, 1988), el *Transformed Soil – Adjusted Vegetation Index* (TSAVI) (Baret y Guyot, 1991), el *Modified Soil – Adjusted Vegetation Index* (MSAVI) (Qi *et al.*, 1994) y el *Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index* (OSAVI) (Rondeaux *et al.*, 1996; Haboudane *et al.*, 2004; He *et al.*, 2006). Diferentes autores han estudiado la importancia de tener en cuenta los efectos de los diferentes ángulos de observación

al aplicar estos índices (Galvao *et al.*, 2013; He *et al.*, 2016).

La región del espectro de transición entre el rojo y el infrarrojo, conocido como el *Red-Edge*, está muy relacionada con el LAI y otros parámetros biofísicos de la vegetación (He *et al.*, 2016; Delegido *et al.*, 2011; 2013). Recientemente se ha propuesto un nuevo índice, optimizado para la estimación del LAI por teledetección, el *Normalized Difference Index*, NDI (Delegido *et al.*, 2013), el cual se presenta como un índice de vegetación basado en las interacciones de la vegetación en la región del *Red-Edge*. Este índice se describe matemáticamente mediante una ecuación similar a la del NDVI:

$$NDI_{a-b} = \frac{R_b - R_a}{R_b + R_a} \quad (1)$$

Donde  $R_{a,b}$  son los valores de la reflectividad en las bandas a y b, correspondientes a la banda de absorción de la clorofila y la reflectividad de la vegetación sobre la región del *Red - Edge*. Delegido *et al.* (2013) demuestran que la combinación de bandas que presenta mayor correlación lineal con el LAI experimental en distintas campañas de la Agencia Espacial Europea (ESA), se obtiene con la combinación de 674 y 712 nm. El índice ha sido integrado en una metodología para la estimación del LAI verde y el LAI marrón de la vegetación seca (Delegido *et al.*, 2015). En la realización de este estudio se ha usado este método para la estimación del LAI en cultivos, pero en este caso usaremos las longitudes de onda 665 nm y 705 nm correspondientes a las bandas B4 y B5 del satélite Sentinel-2 de la ESA lanzado recientemente y que presenta como importante novedad en comparación con misiones similares, la incorporación de bandas en el *Red-Edge* cuya importancia en la determinación de parámetros biofísicos ha sido ampliamente demostrada (Delegido *et al.*, 2011; Dong *et al.*, 2015; Sibanda *et al.*, 2015).

### 3. Datos

Los datos usados en este estudio fueron obtenidos en la campaña *Sentinel-3 Experiment* (Sen3Exp) de la ESA (ESA, 2009), realizada dentro del programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*). Los datos de Sen3Exp incluyen medidas de los sensores espaciales

MERIS, AATSR y PROBA/CHRIS y aerotransportados como el AHS, al igual que medidas en campo. Barrax (Albacete, España) fue uno de los dos lugares seleccionados para la realización de la campaña Sen3Exp. La campaña de Barrax se llevó a cabo del 20 al 24 de Junio de 2009 y se tomaron medidas conducentes a la estimación de parámetros biofísicos de la vegetación, como el LAI, la fracción de cobertura vegetal verde (FCover), la fracción de radiación fotosintéticamente activa (fAPAR), y los contenidos de agua y clorofila en la vegetación (Delegido *et al.*, 2008). En total fueron caracterizadas 46 ESU's (unidades elementales de muestreo) correspondientes a 14 campos y 9 cultivos diferentes, de las que 31 fueron utilizadas en el presente estudio.

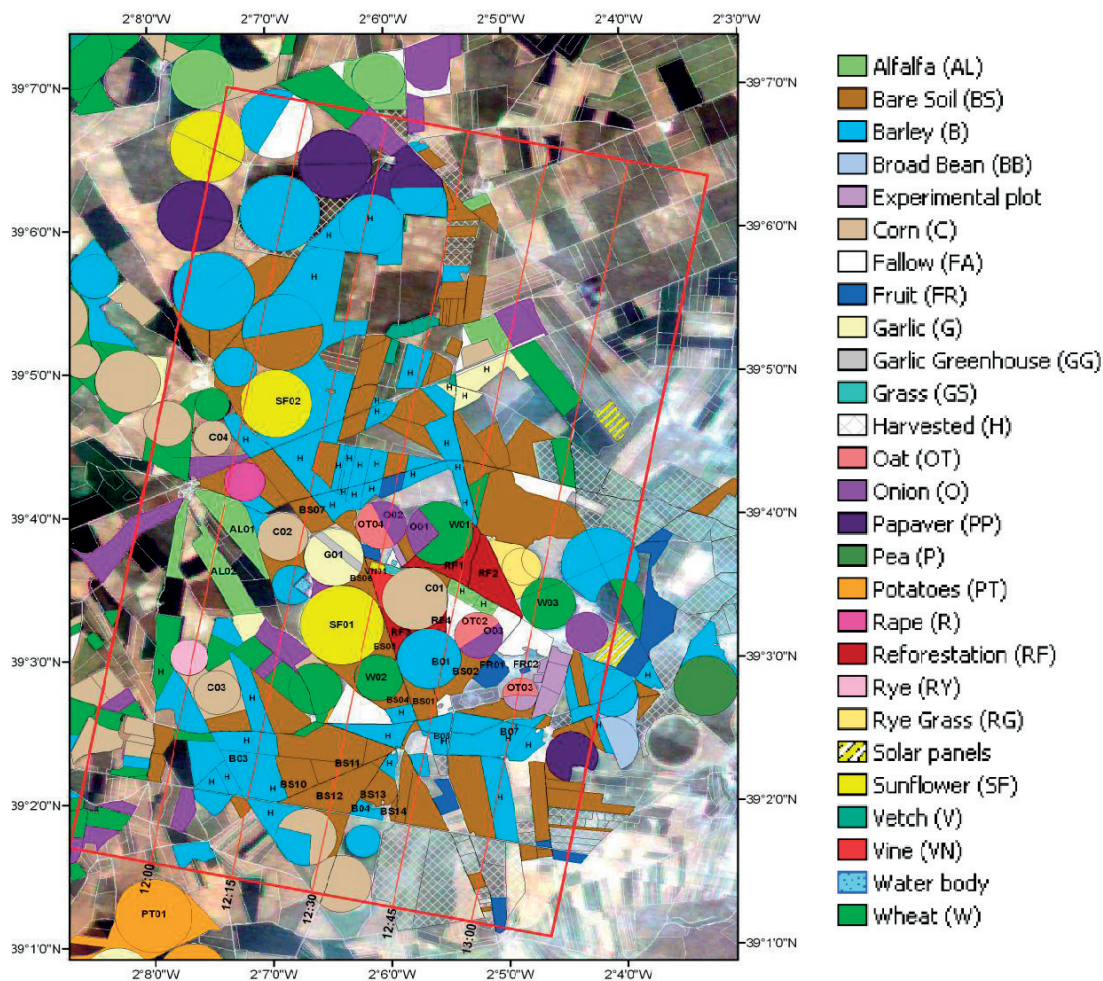
#### 3.1. Descripción del lugar de la prueba

El campo experimental en Barrax se encuentra localizado al oeste de la provincia de Albacete (coordenadas 30°3' N, 2° 6' W, Datum ETRS89), sobre una meseta a 700 m de altitud. El área se caracteriza por su morfología plana y parcelas uniformes. Las condiciones climáticas corresponden a las de clima mediterráneo: precipitación media en invierno, primavera y otoño y mínima en verano, con fuertes oscilaciones térmicas. La precipitación media anual es de 400 mm, por lo que representa una de las regiones más secas de Europa.

Aproximadamente el 65% de los cultivos de la región son de secano y el 35% de terreno irrigado por extracción de agua subterránea. En la Figura 1 se muestra un mapa de usos del suelo durante la campaña de campo. Los cultivos de trigo (W) y cebada (B) se encontraron en estado de senescencia en el tiempo de la campaña de campo, y muchos campos habían sido cosechados (H). Dentro de los campos irrigados se encontraban cultivos de maíz (C) con diferentes estados de desarrollo (con rangos de altura entre 0,5 y 1,5 metros); cebolla (O), ajo (G), patata (P), alfalfa (AL) girasol (S) y avena (OT). En menor proporción se encontraban viñedos y árboles frutales.

#### 3.2. Descripción de datos PROBA/CHRIS y SENTINEL-2

El sensor CHRIS a bordo de la plataforma PROBA, es un sensor hiperespectral de alta



**Figura 1.** Mapa de usos de suelo en el área de estudio. El área cubierta por los datos de sobrevuelo se muestra en rojo (ESA, 2009).

resolución espacial. Una de las características más importantes de CHRIS es la posibilidad de observar cada píxel desde cinco ángulos de observación (nadir, +55°; -55°; +36°; -36°) (Alonso y Moreno, 2004). Dependiendo de la configuración se puede cambiar el número y la posición de sus bandas espectrales. Las imágenes captadas por CHRIS durante la campaña fueron obtenidas en Modo 1 (con 62 bandas entre 415 y 1050 nm y una resolución espacial a nadir de 34 m) optimizado para el estudio de la vegetación.

Los datos obtenidos con PROBA/CHRIS sirven como datos de entrada para la simulación de las bandas espectrales del satélite de la ESA

Sentinel-2 perteneciente a la misión GMES de observación de la Tierra. El primero de los Sentinel-2 se ha lanzado con éxito en junio de 2015. Es de órbita polar, y obtiene imágenes multiespectrales de alta resolución con un *swath* de 290 km y FOV=20,6° (ESA, 2016). Provisto de 13 bandas espectrales ubicadas en la región del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, ubicando 3 nuevas bandas centradas a 705, 740 y 783 nm. Cuenta con 3 bandas en el visible y una en el infrarrojo cercano a 10 m, 6 en el *Red-Edge* e infrarrojo cercano a 20 m y 3 bandas en el SWIR a 60 m de resolución espacial. La frecuencia de visita es de 5 días en el Ecuador, y en general cada 10 días en latitudes medias (Drusch *et al.*, 2012;

ESA, 2016), disminuyendo a la mitad cuando se lance el segundo Sentinel-2, previsto para 2016.

Las imágenes del primer Sentinel-2 ya se pueden descargar de la página oficial de la ESA, que proporciona además una *toolbox* que permite realizar diferentes procesados de las imágenes, entre ellas la corrección atmosférica.

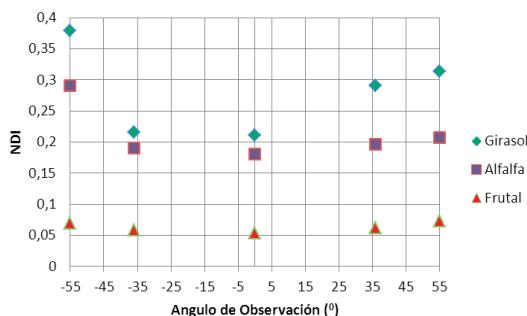
#### 4. Resultados

Para el presente estudio se han usado datos de 9 cultivos en 34 unidades elementales de muestreo en la campaña Sen3Exp, mientras se obtenían dos imágenes PROBA/CHRIS en modo 1, bajo 5 ángulos de observación. Estas imágenes fueron captadas a las 10:08 y 10:20 hora local de los días 19 y 29 de junio del 2009, siendo el ángulo cenital de iluminación de 29,5° y 28,3° respectivamente. Las imágenes fueron corregidas geométrica (Alonso y Moreno, 2004) y atmosféricamente con el método de Guanter *et al.* (2005).

Las medidas de LAI seleccionadas para este trabajo fueron derivadas del procesado de fotografías hemisféricas (ESA, 2009). Los datos de LAI medidos en campo variaron entre 0 y 3 para la mayoría de los cultivos, salvo para tres ESU's ubicados en campos de patata, para los que los valores de LAI alcanzados fueron: de 6,7; 6,9 y 7,21 valores que describen una vegetación desarrollada. Sin embargo, en las imágenes del sensor CHRIS obtenidas para los dos ángulos de +55° y -55° este campo de cultivos se encuentra fuera de la imagen.

##### 4.1. Influencia de la geometría de adquisición en el NDI

En la Figura 2 se representa el NDI en función del ángulo cenital de observación para tres cultivos con diferencias estructurales y distinta influencia del suelo. Concretamente para el frutal (árboles separados con suelo desnudo), la alfalfa (cultivo bajo que cubre completamente el suelo) y el girasol, que en ese momento tenía un desarrollo intermedio, con un metro de altura aproximadamente. En la Figura 2 se aprecia que la anisotropía de la reflectividad para estos cultivos es más acentuada para el caso del girasol, y más suave para los casos de la alfalfa y el frutal.



**Figura 2.** Variación del NDI con el ángulo cenital de observación en tres cultivos seleccionados: frutal, alfalfa y girasol.

Se puede observar una relación entre el ángulo de observación y el NDI, ya que a medida que aumenta el ángulo cenital de observación también aumenta el NDI, tanto para los ángulos positivos como negativos, resultado que coincide con Jiménez *et al.* (2005).

Otros autores, como Camacho *et al.*, (2002) han analizado los mecanismos físicos que gobiernan la Función de Distribución de la Reflectividad Bidireccional BRDF y en particular el *gap effect* (efecto hueco), con el objetivo de estudiar la influencia del ángulo de observación en el cálculo de los índices de vegetación. En concreto, en el estudio realizado por Verger *et al.* (2004) para el NDVI, se puede establecer que existe una relación en el comportamiento de estos índices de vegetación con el efecto de hueco de la superficie. Nuestros resultados coinciden con estos autores en que la configuración más adecuada para reducir el 'ruido' producido por el comportamiento no lambertiano de la vegetación es la obtenida desde el nadir, ya que la anisotropía es mínima. No obstante, los valores mostrados en la Figura 2 indican que también para los ángulos de observación de ±36° el índice NDI varía poco por lo que se pueden obtener buenos resultados mediante el cálculo de este índice.

##### 4.2. Relación entre el LAI y el NDI

Se ha calculado el Índice de Diferencia Normalizada NDI para cada una de las imágenes adquiridas el 19 de Junio de 2009 en los 5 ángulos de observación del sensor CHRIS, aplicando la ecuación (1) con  $a=665$  nm y  $b=705$  nm.

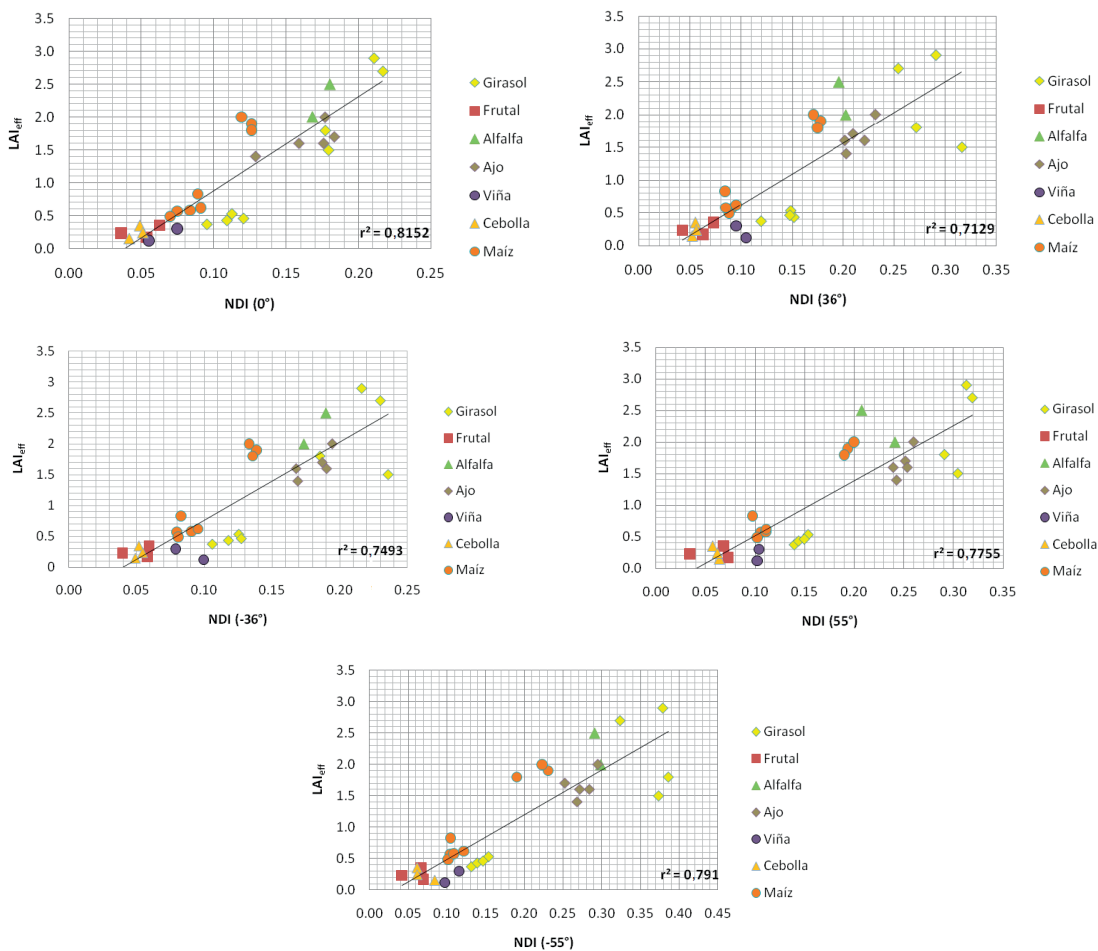
Una vez calculado el NDI para cada uno de los ESU's, se ha representado gráficamente el LAI medido en cada ESU en función del NDI en los 5 ángulos de observación de CHRIS. En la Figura 3 se muestra la correlación existente entre el LAI y el NDI, en cada uno de los diferentes ángulos de observación del sensor.

En la Tabla 1 se muestran tanto los coeficientes de cada ajuste como el coeficiente de determinación  $r^2$  para cada ángulo de observación. Los resultados muestran que la mayor correlación se encuentra para el ángulo de observación de nadir ( $0^\circ$ ) mediante un ajuste lineal con un  $r^2=0,815$ ; sin embargo, se observa que los valores de  $r^2$  para los demás ángulos de observación se mantienen aceptables, siendo menor para los ángulos extremos  $\pm 55^\circ$ . Esta menor correlación para ángulos

de observación grandes, puede ser debida a las diferencias estructurales de los cultivos en estudio, pues en algunos se observa una mayor influencia del *gap effect*. En general la observación bajo ángulos grandes produce una sobrestimación del LAI para cultivos donde la influencia del suelo es mínima; para estos ángulos los valores de  $r^2$  son de 0,775 y 0,791, respectivamente.

**Tabla 1.** Ordenada en el origen (n) y pendiente (m) de los ajustes lineales de la figura 3.

Ángulo	m	n	$r^2$
$-55^\circ$	7,139	-0,227	0,791
$-36^\circ$	12,68	-0,510	0,749
0	14,29	-0,555	0,815
$36^\circ$	9,356	-0,308	0,712
$55^\circ$	8,747	-0,360	0,775



**Figura 3.** Correlación entre el LAI y el NDI para los 5 ángulos de observación de PROBA/CHRIS.

De igual forma se puede observar que cultivos con estructura erectófila y LAI alto como el girasol y el maíz, tienden a alejarse de la tendencia general para los ángulos de observación diferentes del nadir, ya que la radiación incidente penetra menos en la cubierta y los estratos superiores reciben más radiación.

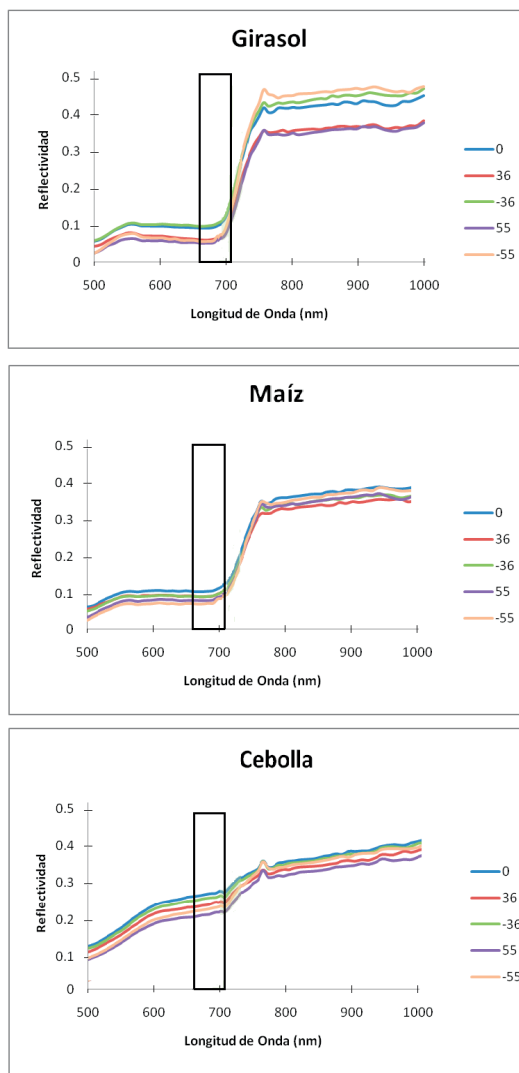
Cultivos con LAI y NDI bajo mantienen una buena correlación para los diferentes ángulos de observación, ya que corresponden a cubiertas abiertas donde la respuesta espectral del suelo domina la escena, teniendo un mayor efecto en el visible, en especial en el rojo donde la diferencia entre el suelo y la vegetación es más notoria.

Estos valores de correlación hallados permiten observar el carácter anisotrópico de la reflectividad de la vegetación atendiendo a sus propiedades ópticas y estructurales, observándose que la respuesta espectral es perturbada por la existencia del *gap effect*.

Por otra parte, gracias a los datos multiangulares del sensor CHRIS, es posible analizar la influencia que el *gap effect*, tiene en la respuesta espectral de la cubierta, el cual, produce una variación de la reflectividad a medida que el sensor se desplaza del nadir, y que se traduce en una menor reflectividad en el visible debido a este desplazamiento, mientras que en el infrarrojo cercano ocurre el efecto contrario.

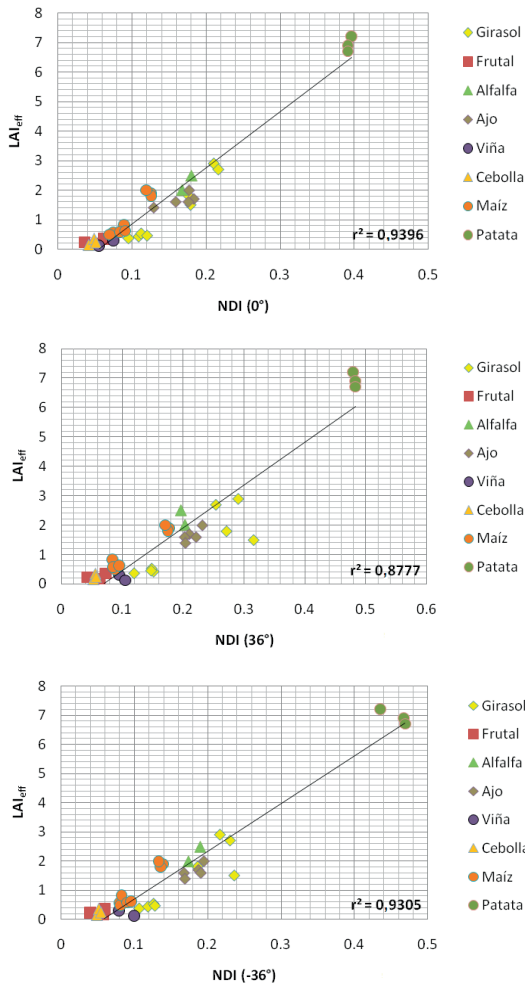
Sin embargo, la influencia de este efecto es minimizada al analizar la signatura espectral de la vegetación en la región del *Red - Edge*, en donde no existen fuertes variaciones a medida que el sensor se desplaza del nadir, como se observa en los espectros de los cultivos de girasol, maíz y cebolla presentes en el área de estudio y que se muestran en la Figura 4.

El rectángulo en cada gráfica de la Figura 4 indica la región de análisis para el caso del NDI (665 y 705 nm), y en la cual se observa que para la reflectividad en la longitud de onda ubicada en el *Red-Edge* (705 nm) el *gap effect* es mínimo comparado con las variaciones presentes en la banda del infrarrojo cercano. Aunque para cultivos donde el efecto del suelo es mayor, se tiene que la reflectividad de la superficie aumenta al acercarse al ángulo de observación de nadir.



**Figura 4.** Variación de la reflectividad obtenida por PROBA/CHRIS en función del ángulo de observación en distintos cultivos.

Dada la disponibilidad de datos de medidas de LAI superiores a 6, obtenidas en tres puntos (ESUs) diferentes en el campo de patatas, se han introducido estos datos en el modelo diseñado para las tres imágenes en las cuales aparece dicho campo. Como se puede observar en la Figura 5, la correlación del LAI con el NDI en la imagen de nadir aumenta, siendo igual a  $r^2=0,940$  mientras que para los ángulos de 36 y  $-36^\circ$  la correlación es igual a 0,878 y 0,931 que siguen siendo valores de correlación altos.

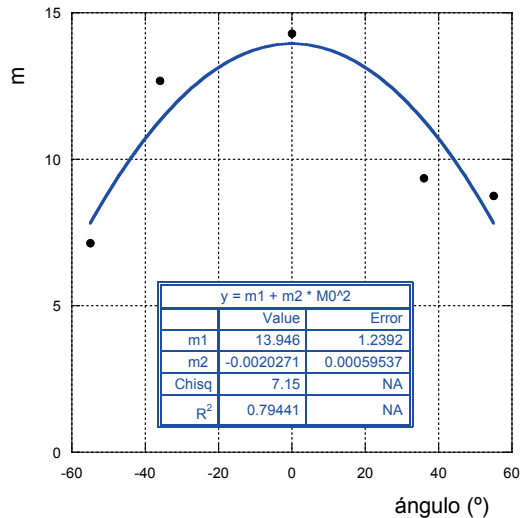


**Figura 5.** Nueva correlación entre el LAI y el NDI agregando datos de un cultivo de patata, imagen PROBA/CHRIS de nadir, 36° y -36°.

### 4.3. Dependencia angular

Con el objetivo de buscar una ecuación que nos permita estimar el LAI en función del ángulo, hemos representado gráficamente los datos de la Tabla 1. En la Figura 6 se muestran los valores de la pendiente de los ajustes en función del ángulo, y en la Figura 7 los valores de la ordenada en el origen en función del ángulo.

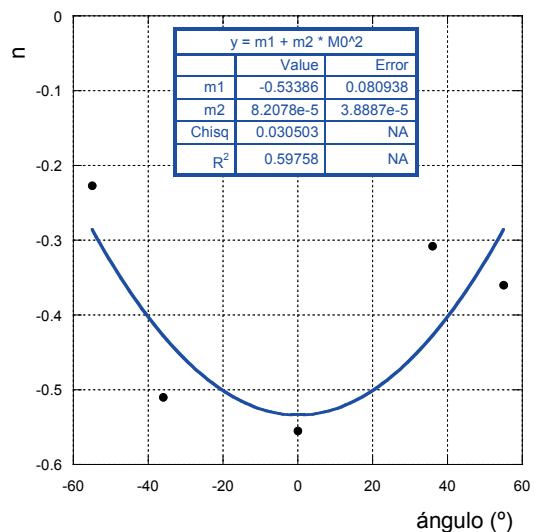
Ambos coeficientes se pueden ajustar a un polinomio de segundo grado, obteniéndose para “m” un  $r^2=0,794$  y para “n” un  $r^2=0,598$ . Además, el segundo coeficiente de cada ajuste es prácticamente cero, lo que da lugar a un polinomio simétrico respecto al eje y que puede ser interpretado como que



**Figura 6.** Pendiente m de los ajustes (Tabla 1) en función del ángulo de observación.

el LAI solo depende del valor absoluto del ángulo de observación en las condiciones de iluminación con las que se obtuvo la imagen PROBA/CHRIS.

Introduciendo en una ecuación única los ajustes obtenidos de las Figuras 6 y 7 se llega a la expresión:



**Figura 7.** Ordenada en el origen n de los ajustes (Tabla 1) en función del ángulo de observación.



$$\text{LAI} = (-0,002027 \phi^2 + 13,946) \text{NDI} + 0,0000821 \phi^2 - 0,5339 \quad (2)$$

donde  $\phi$  es el ángulo de observación, variable entre  $0^\circ$  y  $55^\circ$ .

La ecuación 2 nos permite obtener el LAI a partir de imágenes de satélite, por ejemplo de Sentinel-2. Teniendo en cuenta que el FOV de este satélite es de  $20,6^\circ$  (ESA, 2016) se puede observar de la ecuación 2 que los píxeles con ángulos de observación alrededor de  $10^\circ$  cercanos a los bordes en una imagen Sentinel-2 pueden subestimar el LAI en un 1,4% respecto a los observados en nadir.

## 5. Conclusiones

Dada la alta correlación lineal existente entre el LAI y las bandas usadas en este estudio (665 y 705 nm) para el cálculo del NDI, éste se muestra como un índice de vegetación que gracias a su configuración espectral minimiza los efectos de la anisotropía de la reflectividad de la vegetación, provocada por factores ópticos y estructurales.

La geometría de adquisición del NDI permite observar que la anisotropía de la reflectividad de la vegetación para el ángulo de observación de nadir es mínima, permitiendo una buena estimación del LAI mediante datos de teledetección.

Se ha obtenido una expresión para la estimación del LAI a partir del ángulo de observación y del índice NDI obtenidos por datos de teledetección.

El NDI es un índice de vegetación que muestra la importancia del estudio de cubiertas vegetales en la región del *Red-Edge*, en la cual el nuevo satélite Sentinel-2 tiene ubicadas varias bandas, entre ellas la B5, que permitirá mejorar la estimación de variables biofísicas como el LAI. Sin embargo, el no tener en cuenta los efectos del ángulo de observación en el método puede introducir distorsiones del 1,4% en la estimación del LAI.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo del proyecto “Creación y puesta en marcha del Centro de Estudios del Agua y del Medio Ambiente para el Magdalena Medio (CEAMAM)” de Colombia, proyecto de cooperación entre la Universidad de Valencia (España) y el Ayuntamiento de Barrancabermeja (Colombia).

## Referencias

- Alonso, L., Moreno, J. 2004. Quasi-Automatic Geometric Correction and Related Geometric Issues in the Exploitation of CHRIS/Proba Data. En: *Proceedings of the second CHRIS/Proba Workshop*, 28-30 April 2004, ESA/ESRIN, Frascati, Italy (ESA SP-578, July 2004).
- Bacour, C., Baret, F., Béal, D., Weiss, M., Pavageau, K. 2006. Neural network estimation of *LAI*, *fAPAR*, *fCover* and  $LAI \times C_{ab}$  from top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 105(4), 313-325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.014>
- Baret, F., Buis, S. 2007. Estimating canopy characteristics from remote sensing observations. Review of methods and associated problems. In S. Liang (ed.), *Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application*. Springer Netherlands. pp. 173-201. [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6450-0\\_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6450-0_7)
- Baret, F., Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35(2-3), 161-173. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Bonan, G. 1993. Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 43(3), 303-314. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90072-6](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(93)90072-6)
- Camacho, F., García-Haro, J., Gilabert, M. A., Meliá, J. 2002. La anisotropía de la BRDF: Una nueva signatura de las cubiertas vegetales. *Revista de Teledetección*. 18, 29-46.
- Chen, J. M., Pavlic, G., Brown, L., Cihlar, J., Leblanc, S. G., White, H. P., Hall, R. J., Peddle, D.R., King, D.J., Trofymow, J.A., Swift, E., Van der Sanden, J., Pellikka, P. K. E. 2002. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 165-184. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00300-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00300-5)
- Delegido, J., Fernández, G., Gandía, S., Moreno, J. 2008. Retrieval of chlorophyll content and LAI of crops using hyperspectral techniques: Application to PROBA/CHRIS data. *International Journal of Remote Sensing* 29(24), 7107-7127. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802238401>
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso L., Moreno, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors*, 11(7), 7063-7081. <http://dx.doi.org/10.3390/s110707063>

- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J.P. Alonso, L., Moreno, J. 2013. A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over Agroecosystems. *European Journal Agronomy*, 46, 42-52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2012.12.001>
- Delegido, J., Verrelst, J., Rivera, J.P., Ruiz-Verdú, A., Moreno, J. 2015. Brown and green LAI mapping through spectral indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35(B), 350-358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.10.001>
- Dong, T., Meng, J., Shang, J., Liu, J., Wu, B. 2015. Evaluation of Chlorophyll-Related Vegetation Indices Using Simulated Sentinel-2 Data for Estimation of Crop Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8), 4049-4059. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2400134>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- ESA. 2009. SEN3EXP Ground Measurement Acquisition Report Vegetation Parameters. Barrax site, 20-24 June, 2009.
- ESA. 2016. GMES observing the earth, Sentinel-2. Último acceso: 10 de Enero, 2016, de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2>
- Galvão, L. S., Breunig, F.M., Santos, J. R., Moura, Y.M. 2013. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 291-300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.005>
- Gilbert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 1-10.
- Guanter, L., Alonso, L., Moreno, J. 2005. A method for the surface reflectance retrieval from Proba/CHRIS data over land: Application to ESA SPARC campaigns. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 43(12), 2908-2917. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2005.857915>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, J. P., Strachan, I. B. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337-352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- He, Y., Guo, X., Wilmshurst, J. 2006. Studying mixed grassland ecosystems I: suitable hyperspectral vegetation indices. *Journal Remote Sensing*, 32(2), 98-107. <http://dx.doi.org/10.5589/m06-009>
- He, L., Song, X., Feng, W., Guo, B. B., Zhang, Y. S., Wang, Y. H., Wang, C. Y., Guo, T. C. 2016. Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 174, 122-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.007>
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A., Martínez, P. 2005. Fractional vegetation cover estimation from Proba/CHRIS data: methods, analysis of angular effects and application to the land surface emissivity retrieval. En: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> CHRIS/ProbaWorkshop*. 21-23 de marzo, ESA-ESRIN, Frascati, Italia.
- Pearson, R. L., Miller L. D. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. En: *Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM International. 1357-1381.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119-126. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Richardson, A. J., Wiegand, C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *ISPRS J. Photogramm.* 4, 1541-1552.
- Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rouse, J.W. Haas, R.H. Schell, J. A. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III. Final Report. Greenbelt, MD, USA. 1-371.

- Sibanda, M., Mutanga, O., Rouget, M. 2015. Examining the potential of Sentinel-2 MSI spectral resolution in quantifying above ground biomass across different fertilizer treatments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 110, 55-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.005>
- Verger, A., Camacho, F., Meliá, J. 2004. Influencia de la geometría de adquisición en el NDVI. *Revista de Teledetección*, 21, 95-99.
- Verger, A. 2008. Anàlisi comparativa d'algorismes operacionals d'estimació de paràmetres biofísics de la coberta vegetal amb teledetecció. *PhD tesis, Universidad de València*. 307 pp.
- Watson, D. J. 1947. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between yeas. *Annals of Botany*, 1, 41-76.

