

Arlanzón, D.; Rodríguez-Galiano, V.; Canero, F.; Cárdenas-Martínez, A. Evaluación comparativa de EnMAP y Sentinel-2 para la estimación de rasgos biofísicos en los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir

Evaluación comparativa de EnMAP y Sentinel-2 para la estimación de rasgos biofísicos en los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir

Arlanzón, Daniel ¹ Rodríguez-Galiano, Víctor ¹ Canero, Francisco M. ¹ Cárdenas-Martínez, Aarón ¹

¹ Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, 41004 Sevilla, España

ORCID: Arlanzón [0000-0001-5305-8415](https://orcid.org/0000-0001-5305-8415) Rodríguez-Galiano [0000-0002-5422-8305](https://orcid.org/0000-0002-5422-8305) Canero [0000-0002-7813-1487](https://orcid.org/0000-0002-7813-1487)
Cárdenas-Martínez [0000-0003-1649-7720](https://orcid.org/0000-0003-1649-7720)

Correspondencia: darlanzon@us.es vrgaliano@us.es fcanero@us.es acardenasm@us.es

RESUMEN

Las nuevas misiones hiperespectrales permiten identificar rasgos de absorción sutiles esenciales para el monitoreo agrícola avanzado. Este estudio compara la capacidad del sensor hiperespectral EnMAP y el multiespectral Sentinel-2 en la estimación de rasgos biofísicos en el cultivo de arroz del Bajo Guadalquivir. Se empleó un enfoque híbrido basado en PROSAIL-PRO y algoritmos de Machine Learning (ML), optimizados mediante Active Learning (AL) para mitigar la redundancia espectral. Los resultados demuestran la mayor capacidad de EnMAP en la caracterización bioquímica foliar, alcanzando valores de R² de 0,93 para carotenoides (CAR) y de 0,92 para nitrógeno foliar (LNC). En comparación, Sentinel-2 mostró correlaciones más moderadas, con R² inferiores a 0,90 en todos los rasgos y limitaciones críticas en parámetros estructurales como el índice de área foliar (LAI) y la clorofila a nivel de dosel (CCC). Esta diferencia sugiere que la resolución espectral de EnMAP es clave para diferenciar las señales bioquímicas y la estructura del dosel. La eficacia de la tecnología hiperespectral frente a la multiespectral sienta las bases para que la misión europea CHIME se consolide como una herramienta esencial para la toma de decisiones en el sector agrario.





Palabras clave: EnMAP, rasgos biofísicos, arrozales, Machine Learning, agricultura

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Evaluación comparativa de EnMAP y Sentinel-2 para la estimación de rasgos biofísicos en los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir

Arlanzón, Daniel ⁽¹⁾, Rodríguez-Galiano, Víctor ⁽¹⁾, Canero, Francisco M. ⁽¹⁾, Cárdenas-Martínez, Aarón ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla Sevilla, España.

 0000-0001-5305-8415, darlanzon@us.es ;  0000-0002-5422-8305, vrgaliano@us.es
 0000-0002-7813-1487, fcanero@us.es ;  0000-0003-1649-7720, acardenasm@us.es

Resumen: Las nuevas misiones hiperespectrales permiten identificar rasgos de absorción sutiles esenciales para el monitoreo agrícola avanzado. Este estudio compara la capacidad del sensor hiperespectral EnMAP y el multiespectral Sentinel-2 en la estimación de rasgos biofísicos en el cultivo de arroz del Bajo Guadalquivir. Se empleó un enfoque híbrido basado en PROSAIL-PRO y algoritmos de *Machine Learning* (ML), optimizados mediante *Active Learning* (AL) para mitigar la redundancia espectral. Los resultados demuestran la mayor capacidad de EnMAP en la caracterización bioquímica foliar, alcanzando valores de R^2 de 0,93 para carotenoides (CAR) y de 0,92 para nitrógeno foliar (LNC). En comparación, Sentinel-2 mostró correlaciones más moderadas, con R^2 inferiores a 0,90 en todos los rasgos y limitaciones críticas en parámetros estructurales como el índice de área foliar (LAI) y la clorofila a nivel de dosel (CCC). Esta diferencia sugiere que la resolución espectral de EnMAP es clave para diferenciar las señales bioquímicas y la estructura del dosel. La eficacia de la tecnología hiperespectral frente a la multiespectral sienta las bases para que la misión europea CHIME se consolide como una herramienta esencial para la toma de decisiones en el sector agrario.

Palabras clave: EnMAP, rasgos biofísicos, arrozales, Machine Learning, agricultura

A comparative assessment of EnMAP and Sentinel-2 for the retrieval of biophysical traits in the rice crops of the Lower Guadalquivir region

Abstract: *New hyperspectral missions enable the identification of subtle absorption features essential for advanced agricultural monitoring. This study compares the performance of the EnMAP hyperspectral and Sentinel-2 multispectral sensors in estimating biophysical traits in rice crops in the Lower Guadalquivir region. A hybrid approach based on PROSAIL-PRO and Machine Learning (ML) algorithms was employed, optimized through Active Learning (AL) to mitigate spectral redundancy. The results demonstrate the superior capacity of EnMAP for leaf biochemical characterization, achieving R^2 values of 0.93 for carotenoids (CAR) and 0.92 for leaf nitrogen content (LNC). In comparison, Sentinel-2 showed more moderate correlations, with R^2 values below 0.90 across all traits and critical limitations in structural parameters such as Leaf Area Index (LAI) and canopy chlorophyll content (CCC). This difference suggests that EnMAP's spectral resolution is key to distinguishing biochemical signals from canopy structure. The efficacy of hyperspectral technology over multispectral alternatives sets the stage for the European CHIME mission to become a key tool for decision-making in the agricultural sector.*

Keywords: *EnMAP, biophysical traits, rice paddies, Machine Learning, agriculture*

1. INTRODUCCIÓN

La alta resolución de los sensores hiperespectrales (400–2.500 nm) posibilita la identificación de rasgos de absorción sutiles que son inaccesibles para los sensores multiespectrales de bandas discretas (Lu *et al.*, 2020). Mientras que misiones como Sentinel-2 han estandarizado el uso de bandas en el infrarrojo cercano y de onda corta para el monitoreo agrícola, las misiones

italiana PRISMA y alemana EnMAP ofrecen una resolución espectral superior a 200 bandas que permite una discriminación más precisa de rasgos bioquímicos y estructurales, sentando además las bases operativas para la futura misión CHIME (Nieke & Rast, 2018). Evaluar la sinergia y el valor añadido de estas plataformas hiperespectrales frente a los estándares

multiespectrales es hoy una prioridad para la teledetección avanzada aplicada a la agricultura.

Este avance tecnológico es crucial para el monitoreo de cultivos como el arroz (*Oryza sativa* L.), piedra angular de la seguridad alimentaria global y fuente calórica primaria para más de la mitad de la población mundial. Se estima que la producción global de este cereal deberá crecer hasta alcanzar los 598 millones de toneladas en 2034 para satisfacer la demanda creciente (OECD/FAO, 2025). En España, las marismas del Bajo Guadalquivir representan un agroecosistema estratégico para su producción. No obstante, estas áreas son especialmente vulnerables al cambio climático y a eventos extremos como las sequías. En este escenario, un monitoreo preciso y oportuno del estado del cultivo es esencial para optimizar las prácticas de manejo y asegurar la estabilidad del rendimiento.

La caracterización de rasgos biofísicos permite evaluar el estado fisiológico del arroz de manera integral. A nivel foliar, el contenido de clorofila (LCC) y carotenoides (CAR) son indicadores clave de la capacidad fotosintética y los mecanismos de fotoprotección (Sims & Gamon, 2002). El nitrógeno foliar (LNC) es un *proxy* fundamental de la capacidad metabólica y el estado nutricional; su estimación a través de proteínas es una de las vías más prometedoras mediante sensores hiperespectrales (Berger *et al.*, 2020). Por su parte, el contenido en agua (LWC) informa sobre el estado hídrico, posibilitando abordar una mejor gestión del agua. Finalmente, el índice de área foliar (LAI) es el parámetro estructural necesario para el escalado de estas propiedades al nivel de dosel, particularmente la clorofila (CCC) y el nitrógeno (CNC), de especial interés agronómico (Jay *et al.*, 2017).

Los enfoques híbridos han sido aplicados con éxito en la estimación de los rasgos de cultivo, combinando la base física de los modelos de transferencia radiativa (RTM) con la eficiencia de los algoritmos de *Machine Learning* (Verrelst *et al.*, 2019). Para gestionar la redundancia espectral de las más de 200 bandas de los sensores hiperespectrales, se han empleado técnicas de muestreo inteligente como el *Active Learning* (AL), que optimiza el entrenamiento de los modelos centrándose en las características espectrales más representativas (Berger *et al.*, 2021).

Este estudio evalúa y compara el rendimiento de Sentinel-2 y EnMAP para la estimación de rasgos biofísicos mencionados en el cultivo de arroz. Para ello, se analiza la capacidad predictiva de los siguientes algoritmos: regresión por procesos gaussianos (*Gaussian Process Regression*, GPR), *Random Forest* (RF), redes neuronales (*Neural Networks*, NN), regresión de vectores de soporte (*Support Vector Regression*, SVR) y regresión por mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares Regression*, PLSR). Los objetivos específicos son: (i) analizar la capacidad de ambos sensores en la estimación de cada rasgo; y (ii) evaluar la coherencia espacial de los productos generados, analizando la capacidad de ambas plataformas para capturar la variabilidad del cultivo en la región arrocerá.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza en las marismas del Guadalquivir (Sevilla), una llanura de sedimentos cuaternarios de gran importancia ecológica y agrícola, al ser la principal zona productora de arroz de España. El área presenta un clima mediterráneo con veranos secos y cielos despejados, ideales para la teledetección óptica. No obstante, el periodo 2023-2025 ha estado marcado por una fuerte variabilidad hidrológica: desde una sequía extrema en 2023, donde apenas se sembró el 2,5% de la superficie (debido a la incursión de agua salina por el bajo caudal del río), hasta la recuperación total de la disponibilidad hídrica en 2025, con el 99% del área cultivada (Fig. 1). Esta fluctuación nos permitió muestrear una variada gama de estados vegetativos y condiciones de estrés hídrico y salino.

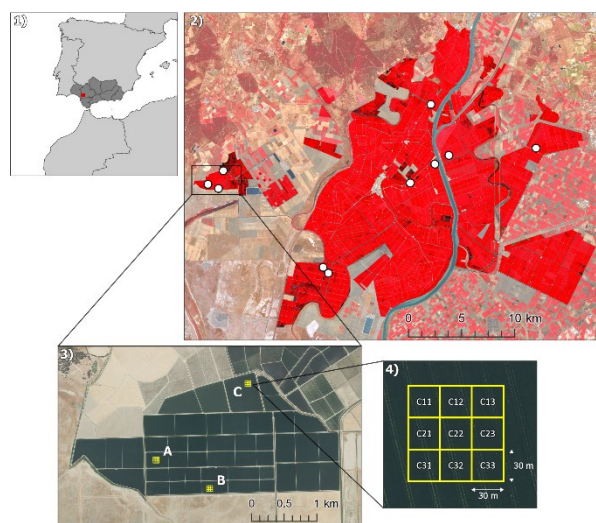


Figura 1. (1) Localización del área de estudio; (2) composición a falso color de Sentinel-2 de los arrozales en verano de 2025 y parcelas de muestreo; (3) detalle de la finca Hato Blanco; y (4) ESUs de la parcela C.

2.2. Datos

Durante los veranos de 2023 y 2024, se obtuvieron imágenes hiperespectrales de la misión EnMAP del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), con 30 m de resolución espacial. Tras eliminar las bandas ruidosas y de absorción de vapor de agua atmosférico, se utilizaron las 191 bandas restantes de EnMAP. Todas las imágenes fueron adquiridas georreferenciadas y en reflectancia de superficie. Simultáneamente, se adquirieron imágenes multiespectrales de Sentinel-2, seleccionando las 10 bandas de 10 y 20 m de resolución espacial.

Para la validación de los productos, se realizaron campañas de campo durante las campañas agrícolas de 2023, 2024 y 2025, sincronizando el muestreo con las fechas de adquisición de ambos sensores. Se definieron unidades de muestreo elementales (*Elementary Sampling Unit*, ESU) de 30×30 m, coincidentes con el pixel hiperespectral. A nivel foliar, se determinó LCC y CAR mediante extracción bioquímica y espectrofotometría (2023-24) y mediante regresión con medidas de SPAD (*Soil and Plant Analysis Development*) *in situ*

(2025). LNC se obtuvo por el método Dumas y LWC por diferencia de peso fresco y seco. Para poder trabajar con variables a nivel de dosel, se midió LAI con un analizador LAI-2200C.

2.3. Métodos

La metodología empleada se basa en un enfoque híbrido que combina RTM y algoritmos de ML. Para el modelado se utilizó PROSAIL-PRO, que acopla el modelo PROSPECT-PRO de hoja y 4SAIL de dosel (Jacquemoud *et al.*, 2009). Este permite obtener directamente el contenido de nitrógeno al distinguir entre proteínas (C_p) y constituyentes basados en carbono (CBC). Para el entrenamiento, se generó una *Look-Up Table* (LUT) de 2.000 espectros de reflectancia simulada. Este tamaño se definió como un compromiso óptimo entre la eficiencia computacional y la representatividad de la variabilidad de los rasgos, siendo un volumen habitual en la literatura para enfoques híbridos (Féret *et al.*, 2021, Tagliabue *et al.*, 2022). Los parámetros de entrada — rangos y distribuciones — se ajustaron a partir de dicha bibliografía y de los valores observados en las campañas de campo de 2023-2024.

Para gestionar la redundancia espectral y evitar combinaciones de parámetros poco realistas, se aplicaron técnicas de AL para cada rasgo biofísico. Se entrenó un modelo de GPR partiendo del 2% de la LUT, al que se añadieron muestras de forma iterativa (Estévez *et al.*, 2022). Cada muestra se mantuvo únicamente si su incorporación reducía el error cuadrático medio (RMSE) frente a los datos de campo. Complementariamente, en los modelos hiperespectrales se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para mitigar la colinealidad de sus 191 bandas espectrales, mientras que para Sentinel-2 se emplearon las 10 bandas. La vinculación con el dato de campo se realizó promediando los píxeles de Sentinel-2 contenidos en cada ESU mediante el vecino más próximo.

A partir del conjunto de muestras más representativas, se entrenaron cinco algoritmos: GPR, RF, NN, SVR y PLSR. La exactitud se evaluó mediante un test independiente con las mediciones de campo de 2023 y 2024 y sus espectros asociados de EnMAP y Sentinel-2. Finalmente, se realizó la estimación espacial de cada rasgo con imágenes satélite de agosto de 2024, cuando se cultivó el 67% de la superficie arrocera. Se mantuvieron las resoluciones nativas de cada sensor en la predicción espacial.

3. RESULTADOS

El análisis comparativo mostró un mejor ajuste estadístico de los modelos basados en EnMAP frente a Sentinel-2 (Fig. 2). Con EnMAP, todos los rasgos alcanzaron un R^2 superior a 0,60 en sus mejores modelos por rasgo, destacando especialmente el CAR ($R^2 = 0,93$) y el LNC ($R^2 = 0,92$) mediante GPR, así como el LWC con NN ($R^2 = 0,90$) y el LCC con SVR ($R^2 = 0,87$). Los rasgos dependientes de la estructura, como el LAI ($R^2 = 0,71$), el CNC ($R^2 = 0,69$) y el CCC ($R^2 = 0,64$), mostraron un ajuste moderado, posiblemente debido a la complejidad de la medición de LAI en campo.

En contraste, Sentinel-2 presentó exactitudes inferiores en CAR (PLSR, $R^2 = 0,60$) y algo más cercanas a EnMAP en LNC ($R^2 = 0,87$) y LAI ($R^2 = 0,67$), ambas con GPR. Además, mostró limitaciones críticas en la estimación de CCC, donde el mejor algoritmo fue NN con $R^2 = 0,20$. Esta diferencia subraya que la mayor resolución espectral de EnMAP es determinante para desacoplar las señales bioquímicas de la estructura del dosel. La capacidad de ambas misiones para capturar la variabilidad fenológica y nutricional de la zona se detalla en la Figura 3, donde se comparan las predicciones espaciales de una selección de rasgos biofísicos.

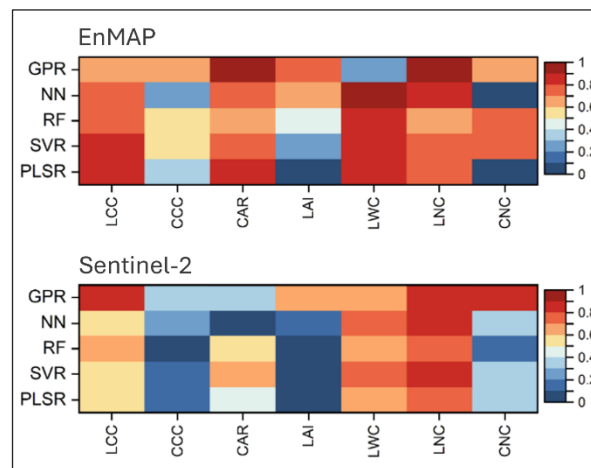


Figura 2. Mapa de calor del ajuste (R^2) de los modelos según sensor, algoritmo y rasgo biofísico.

4. CONCLUSIONES

Este estudio evidencia el mayor potencial de la misión EnMAP frente a Sentinel-2 para el monitoreo biofísico del arroz en el Bajo Guadalquivir. La metodología híbrida, basada en el modelo físico PROSAIL-PRO y optimizada mediante AL, permitió obtener estimaciones exactas de rasgos clave como el nitrógeno foliar y los carotenoides ($R^2 > 0,90$). La resolución hiperespectral resulta determinante para discriminar las señales bioquímicas de la estructura del dosel, superando las limitaciones observadas en las bandas multispectrales de Sentinel-2 para parámetros como el LAI. La coherencia espacial de los productos generados valida la operatividad de estos modelos para una agricultura de precisión autónoma. Estos hallazgos sientan las bases para la futura misión CHIME dentro del programa Copernicus, que deberá facilitar una gestión hídrica y nutricional más eficiente en agroecosistemas estratégicos y vulnerables.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta contribución se ha desarrollado en el marco del proyecto “HiProEstres: Desarrollo de productos basados en los nuevos sensores satelitales hiperespectrales europeos e IA para la caracterización de estresores en tierras de cultivo” (PID2023-152656OB-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan Estatal 2021-2023. El primer autor es beneficiario de un contrato FPU del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (FPU23/00564).

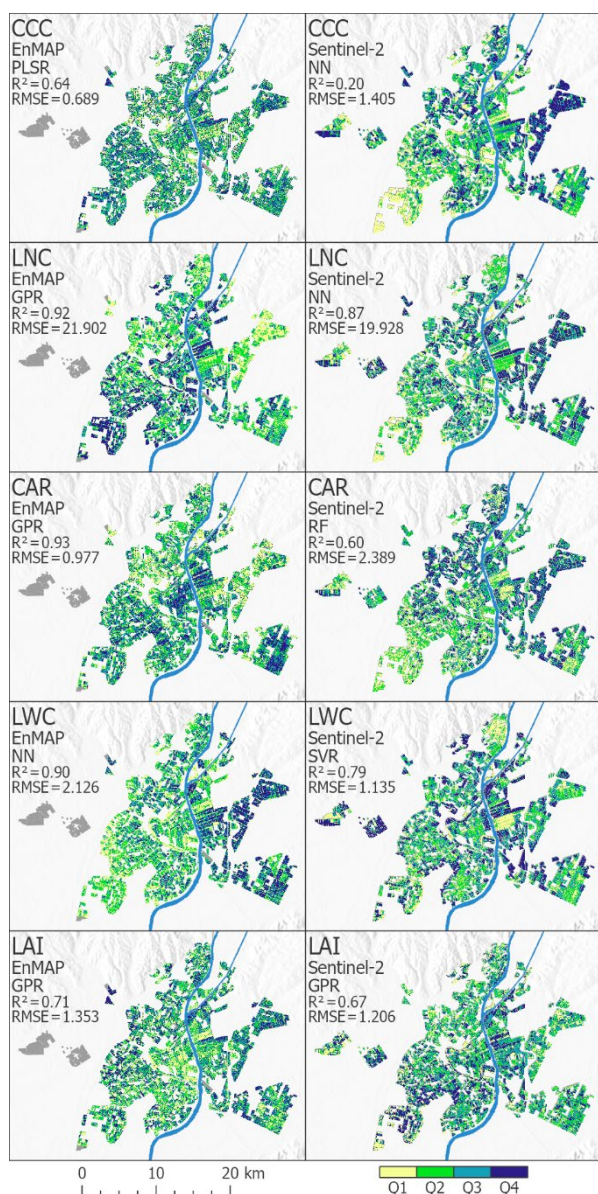


Figura 3. Predicciones espaciales de una selección de variables para los sensores EnMAP (izquierda) y Sentinel-2 (derecha). Las áreas en gris representan parcelas que se encuentran fuera de la huella de la imagen satelital utilizada.

6. REFERENCIAS

- Berger, K., Rivera Caicedo, J. P., Martino, L., Woche, M., Hank, T., & Verrelst, J. (2021). A Survey of Active Learning for Quantifying Vegetation Traits from Terrestrial Earth Observation Data. *Remote Sensing*, 13(2), 287. <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/2/287>
- Berger, K., Verrelst, J., Féret, J. B., Wang, Z., Woche, M., Strathmann, M., Danner, M., Mauser, W., & Hank, T. (2020). Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. *Remote Sensing of Environment*, 242, Article 111758. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>
- Estévez, J., Salinero-Delgado, M., Berger, K., Pipia, L., Rivera-Caicedo, J. P., Woche, M., Reyes-Muñoz, P., Tagliabue, G., Boschetti, M., & Verrelst, J. (2022). Gaussian processes retrieval of crop traits in Google Earth Engine based on Sentinel-2 top-of-atmosphere data. *Remote Sensing of Environment*, 273, Article 112958. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112958>
- Féret, J. B., Berger, K., de Boissieu, F., & Malenovský, Z. (2021). PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents. *Remote Sensing of Environment*, 252, Article 112173. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112173>
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P. J., Asner, G. P., François, C., & Ustin, S. L. (2009). PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113(SUPPL. 1), S56-S66. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.026>
- Jay, S., Maupas, F., Bendoula, R., & Gorretta, N. (2017). Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. *Field Crops Research*, 210, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.005>
- Lu, B., Dao, P. D., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent advances of hyperspectral imaging technology and applications in agriculture. *Remote Sensing*, 12(16), Article 2659. <https://doi.org/10.3390/RS12162659>
- Nieke, J., & Rast, M. (2018). Towards the copernicus hyperspectral imaging mission for the environment (CHIME). International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 157-159. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518384>
- OECD/FAO. (2025). *OECD-FAO agricultural outlook 2025-2034*. FAO Paris, France. <https://doi.org/10.1787/601276cd-en>
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 337-354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Tagliabue, G., Boschetti, M., Bramati, G., Candiani, G., Colombo, R., Nutini, F., Pompilio, L., Rivera-Caicedo, J. P., Rossi, M., Rossini, M., Verrelst, J., & Panigada, C. (2022). Hybrid retrieval of crop traits from multi-temporal PRISMA hyperspectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 187, 362-377. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.014>
- Verrelst, J., Malenovský, Z., Van der Tol, C., Camps-Valls, G., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lewis, P., North, P., & Moreno, J. (2019). Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods. *Surveys in Geophysics*, 40(3), 589-629. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9478-y>