

Bozorgi, M.; Cristóbal, J.; Casadesus, J. Integración de la Teledetección y la modelización de la Eficiencia en el Uso de la Luz (LUE) para la estimación regional a largo plazo del rendimiento de trigo

Integración de la Teledetección y la modelización de la Eficiencia en el Uso de la Luz (LUE) para la estimación regional a largo plazo del rendimiento de trigo

Bozorgi, Mahsa^{1,2} **Cristóbal, Jordi**² **Casadesus, Jaume**¹

¹ Institute of AgriFood, Research and Technology (IRTA)

² Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

ORCID: Bozorgi 0009-0006-2935-2597 Cristóbal 0000-0001-6244-4289 Casadesus 0000-0001-7036-8212

Correspondencia: mahsa.bozorgi@irta.cat jordi.cristobal@uab.cat jaume.casadesus@irta.cat

RESUMEN

La estimación regional del rendimiento de los cultivos es esencial para evaluar la productividad agrícola y orientar estrategias de gestión adaptativa al clima. La Teledetección ofrece observaciones coherentes y de largo plazo sobre la dinámica de la vegetación y las condiciones ambientales; sin embargo, traducir estos datos en estimaciones fiables de rendimiento a escala regional sigue siendo un desafío. En este estudio, implementamos un modelo de eficiencia en el uso de la luz (LUE) impulsado por satélite, con resolución temporal diaria y espacial de 1 km, para estimar la producción primaria bruta (GPP) y derivar rendimientos de trigo en España entre 2003 y 2022. La asimilación estacional de carbono se cuantificó dentro de periodos de crecimiento definidos fenológicamente y extraídos de series temporales suavizadas de NDVI, y los rendimientos se infirieron mediante un enfoque de asignación basado en el índice de cosecha. El desempeño del modelo se evaluó frente a estadísticas regionales reportadas de rendimiento de trigo. El marco LUE reprodujo patrones espaciales e interanuales amplios de productividad del trigo, obteniendo una correlación estadísticamente significativa pero moderada ($r = 0.51$) y mostrando una subestimación sistemática de -0.46 t ha^{-1} . Estos resultados indican que, si bien la integración diaria del estrés ambiental mejora la capacidad del modelo para capturar gradientes regionales de productividad, las incertidumbres en la delimitación fenológica limitan su capacidad para reproducir niveles absolutos de rendimiento. En conjunto, este estudio pone de relieve tanto el potencial como las limitaciones actuales de los enfoques LUE basados en teledetección diaria para el monitoreo regional del rendimiento. Mejorar la parametrización del estrés y refinar la detección fenológica serán aspectos críticos para fortalecer la robustez predictiva en condiciones agroclimáticas heterogéneas.

Palabras clave: *modelo de eficiencia en el uso de la luz, producción primaria bruta, trigo, MODIS, ERA5*

Fecha de recepción: 20 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 20 febrero 2026


Integración de la Teledetección y la modelización de la Eficiencia en el Uso de la Luz (LUE) para la estimación regional a largo plazo del rendimiento de trigo

Bozorgi, Mahsa ^(1,2), Cristóbal, Jordi ⁽²⁾, Casadesus, Jaume ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Efficient Use of Water in Agriculture Program, Institute of AgriFood, Research and Technology (IRTA) Fruitcentre, Parc Agrobiotech, Lleida 25003, Spain.

 0009-0006-2935-2597, mahsa.bozorgi@irta.cat;  0000-0001-7036-8212, jaume.casadesus@irta.cat

⁽²⁾ Departamento de Geografía, Universitat Autònoma de Barcelona, Campus de Bellaterra, Edifici B, Carrer de la Fortuna, s/n, 08193 Bellaterra, Spain.

 0000-0001-7036-8212, jordi.cristobal@uab.cat

Resumen: La estimación regional del rendimiento de los cultivos es esencial para evaluar la productividad agrícola y orientar estrategias de gestión adaptativa al clima. La Teledetección ofrece observaciones coherentes y de largo plazo sobre la dinámica de la vegetación y las condiciones ambientales; sin embargo, traducir estos datos en estimaciones fiables de rendimiento a escala regional sigue siendo un desafío. En este estudio, implementamos un modelo de eficiencia en el uso de la luz (LUE) impulsado por satélite, con resolución temporal diaria y espacial de 1 km, para estimar la producción primaria bruta (GPP) y derivar rendimientos de trigo en España entre 2003 y 2022. La asimilación estacional de carbono se cuantificó dentro de periodos de crecimiento definidos fenológicamente y extraídos de series temporales suavizadas de NDVI, y los rendimientos se infirieron mediante un enfoque de asignación basado en el índice de cosecha. El desempeño del modelo se evaluó frente a estadísticas regionales reportadas de rendimiento de trigo. El marco LUE reprodujo patrones espaciales e interanuales amplios de productividad del trigo, obteniendo una correlación estadísticamente significativa pero moderada ($r = 0.51$) y mostrando una subestimación sistemática de -0.46 t ha^{-1} . Estos resultados indican que, si bien la integración diaria del estrés ambiental mejora la capacidad del modelo para capturar gradientes regionales de productividad, las incertidumbres en la delimitación fenológica limitan su capacidad para reproducir niveles absolutos de rendimiento. En conjunto, este estudio pone de relieve tanto el potencial como las limitaciones actuales de los enfoques LUE basados en teledetección diaria para el monitoreo regional del rendimiento. Mejorar la parametrización del estrés y refinar la detección fenológica serán aspectos críticos para fortalecer la robustez predictiva en condiciones agroclimáticas heterogéneas.

Palabras clave: modelo de eficiencia en el uso de la luz, producción primaria bruta, trigo, MODIS, ERA5

Integrating Remote Sensing and Light-Use Efficiency Modelling for Long-Term Regional Wheat Yield Estimation

Abstract: Regional crop yield estimation is critical for evaluating agricultural productivity and supporting climate-adaptive management under increasing environmental variability. Although remote sensing provides consistent long-term observations of vegetation dynamics and environmental forcing, translating these signals into reliable regional yield estimates remains challenging. In this study, we implemented a satellite-driven light-use efficiency (LUE) framework at daily temporal resolution and 1 km spatial scale to estimate gross primary production (GPP) and derive wheat yields across Spain from 2003 to 2022. Seasonal carbon assimilation was integrated within phenologically defined extracted from smoothed NDVI time series, and grain yield was estimated using a harvest index. Model performance was evaluated against reported field scale wheat yields. The LUE framework successfully reproduced broad spatial gradients and interannual variability in wheat productivity, yielding a statistically significant but moderate correlation ($r = 0.51$) and a systematic underestimation of -0.46 t ha^{-1} . These results indicate that incorporating daily environmental stress improves the model's ability to capture regional productivity patterns; however, uncertainties in phenological timing limit the accuracy of yield estimates. Overall, this study demonstrates the potential of daily remote sensing-driven LUE

approaches for regional yield estimation while highlighting the need for improved stress parameterization and dynamic phenological characterization to enhance predictive robustness under heterogeneous agroclimatic conditions.

Keywords: *light use efficiency model, gross primary production, wheat, MODIS, ERA5*

1. INTRODUCCIÓN

La estimación del rendimiento de los cultivos a escala regional es fundamental para satisfacer la demanda alimentaria, optimizar la gestión del agua en la agricultura y fortalecer la resiliencia agro-económica (Lobell *et al.*, 2009). El trigo es el cereal más importante, ampliamente cultivado y con una demanda creciente a nivel global (Curtis, 2019). Sin embargo, el aumento de las temperaturas y la mayor frecuencia de episodios de sequía amenazan la productividad del cultivo (Asseng *et al.*, 2015). Este desafío es especialmente relevante en España, donde el trigo se cultiva predominantemente en sistemas de secano y las sequías recurrentes asociadas al clima mediterráneo representan un riesgo significativo para la estabilidad del rendimiento (Ribeiro *et al.*, 2019).

Las encuestas agrícolas siguen siendo el referente en cuanto a precisión, pero resultan poco prácticas para grandes extensiones y ofrecen una cobertura temporal limitada (He *et al.*, 2018). Mientras tanto, el cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de las olas de calor y las sequías repentinas, especialmente durante etapas sensibles del crecimiento de los cultivos, lo que provoca pérdidas significativas de rendimiento. Dadas estas condiciones, los marcos de estimación del rendimiento deben representar explícitamente la dinámica espacio-temporal de las condiciones que limitan la productividad. Para mejorar la estimación espaciotemporal, la Teledetección proporciona observaciones espacialmente continuas de la vegetación y de las condiciones ambientales, lo que permite estimar la productividad regional (Lobell, 2013). Los primeros estudios se basaron en relaciones empíricas entre índices de vegetación y rendimiento (Labus *et al.*, 2002; Mkhabela *et al.*, 2005). Aunque estos modelos empíricos funcionan bien en entornos específicos, su aplicabilidad universal es limitada debido a su dependencia de las condiciones biofísicas locales (Padilla *et al.*, 2012). Para superar estas limitaciones se introdujeron enfoques basados en principios físicos, en particular los modelos de eficiencia en el uso de la luz (LUE) derivados del marco de Monteith (Padilla *et al.*, 2012). En el marco LUE, la producción primaria bruta se estima como una función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR), modulada por factores de estrés ambiental. Sin embargo, los productos de GPP a escala regional dependen de variables ambientales agregadas temporalmente, lo que puede ocultar eventos extremos de corta duración.

Este estudio tiene como objetivo incorporar restricciones diarias de estrés ambiental dentro de un marco LUE que mejore la estimación regional del rendimiento del trigo. Para ello, (1) implementamos un modelo LUE diario impulsado por datos MODIS y el reanálisis ERA5; (2) delimitamos la temporada de crecimiento del trigo

utilizando métricas fenológicas extraídas de series temporales de NDVI suavizadas con TIMESAT; y (3) cuantificamos el desempeño del modelo frente a los rendimientos regionales de trigo reportados.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Conjunto de datos de Teledetección y Reanálisis

En la **Tabla 1** se presenta un resumen de los productos satelitales y las variables de ERA5 utilizados en este estudio.

Tabla 1. Datos utilizados en el marco LUE

Datos	Variables	Resolución	
		Temporal	Espacial
MODIS/ Aqua	Surface reflectance, NDVI	Diaria	500m
	LST, emissivity	Diaria	1000m
MODIS/ Combined	LAI and FPAR	4-Días	500m
	Aerosol optical depth (AOD)	Diario	1000m
ERA5	Land cover	Anual	500m
	Air temperature (T_a)		
	Incoming surface radiation		
	Total columnar water vapor (TCWV)	Diario	27,830m
	Atmospheric pressure (P)		
SRTM	Wind speed at 10 m height (u)		
	Elevation	Anual	90m

2.2. Estimación de la GPP y del rendimiento del trigo a partir de satélites

El marco de modelización sigue la formulación TEC descrita por Yuan *et al.*, (2010) la cual se basa en la eficiencia en el uso de la luz (LUE). La productividad primaria bruta diaria (GPP) se calcula como:

$$GPP = \varepsilon_{max} \times PAR \times FPAR \times W_s \times T_s \quad (1)$$

donde GPP ($\text{gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) es la productividad primaria bruta; PAR ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) es la radiación fotosintéticamente activa incidente; FPAR es la fracción de PAR absorbida. ε (gC MJ^{-1}) es la eficiencia máxima en el uso de la luz bajo condiciones óptimas (se adoptó un valor de 2.5 gC MJ^{-1} según estudios previos). W_s y T_s representan los factores de estrés hídrico y térmico, respectivamente (Yuan *et al.*, 2010).

La asimilación estacional se cuantifica integrando la GPP diaria a lo largo del periodo de crecimiento del trigo definido fenológicamente. El rendimiento del trigo se estima posteriormente aplicando un índice de cosecha (HI), que representa la fracción de la biomasa aérea asignada al grano:

$$Yield = \sum_{t=SOS}^{EOS} GPP \times HI \quad (2)$$

donde SOS y EOS indican, respectivamente, el inicio y el final de la temporada de crecimiento, derivados de las series temporales de NDVI suavizadas mediante el procesamiento con TIMESAT. El índice de cosecha (HI) representa la fracción de la biomasa aérea asignada al grano, y en este estudio se adoptó un valor de 0.37, de acuerdo con investigaciones previas.

El análisis de la serie temporal de NDVI de MODIS se realizó mediante TIMESAT (Eklundh & Jönsson, 2017). Se asignaron mayores ponderaciones a las observaciones de mayor calidad y menores ponderaciones a aquellas de calidad inferior; además, se seleccionó el método de suavizado logístico doble, ya que mostró un mejor ajuste a los datos.

El inicio (SOS) y el final (EOS) de la temporada de crecimiento se determinaron a partir de las series temporales de NDVI suavizadas utilizando un enfoque de umbral relativo. En concreto, SOS y EOS se identificaron como las fechas en las que el NDVI supera y posteriormente desciende por debajo del 10% de la amplitud estacional, respectivamente, siguiendo el método propuesto por Zhang *et al.*, 2003.. La amplitud estacional se definió como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de NDVI dentro de cada año hidrológico.

El desempeño del modelo se evaluó utilizando el sesgo medio (mean bias), el coeficiente de correlación (r) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución espacial de la fenología del trigo se presenta en la Figura 1. El inicio de la cobertura del suelo (*start of season*, SOS) ocurre tan temprano como en enero en las regiones del sur y se desplaza progresivamente hacia marzo en las zonas del norte. La madurez fisiológica (*end of season*, EOS) muestra una variabilidad espacial similar, con la maduración ocurriendo entre mayo y agosto, dependiendo de la ubicación geográfica.

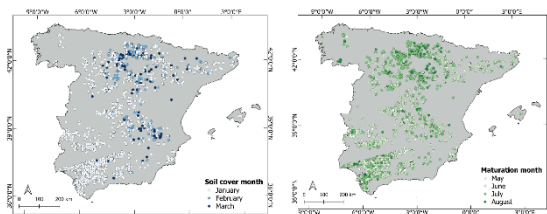


Figura 1. Distribución espacial del momento fenológico del trigo

El gradiente fenológico observado confirma una delimitación espacialmente explícita de la temporada de crecimiento, necesaria para una estimación precisa de la acumulación de carbono y del rendimiento.

La evaluación del modelo mostró una correlación moderada entre los rendimientos de trigo modelados y

los reportados ($r = 0.51$). El modelo presentó un sesgo medio de $-0.46 \text{ ton ha}^{-1}$, lo que revela una subestimación de los rendimientos observados en toda la región de estudio (Figura 2).

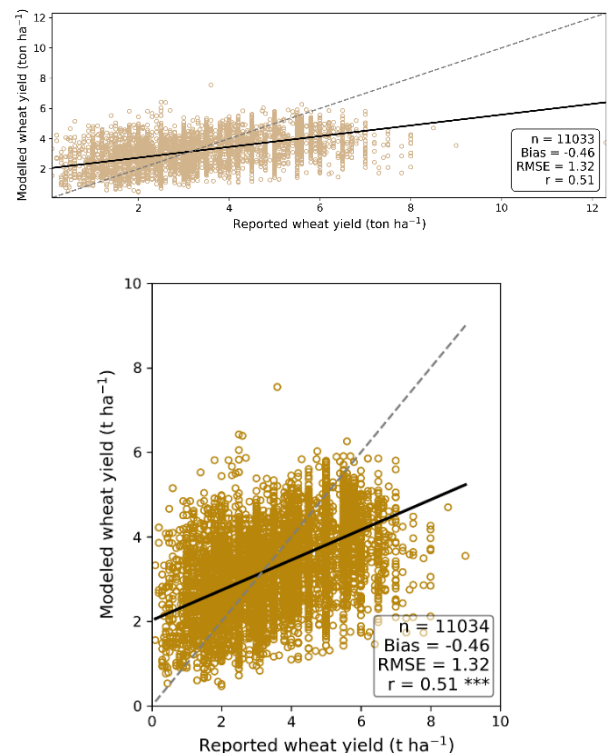
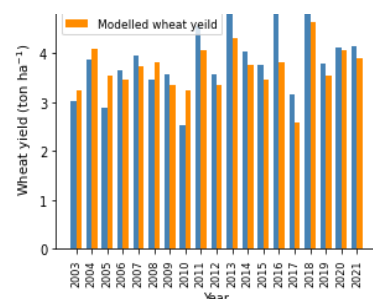


Figura 2. Comparaciones entre los rendimientos de trigo modelados y reportados en España de 2003 a 2021

El sesgo negativo está potencialmente relacionado con las incertidumbres en la detección de las etapas fenológicas a partir de las series temporales de NDVI. Una representación incorrecta del momento en que ocurre la cobertura del suelo por el cultivo o su madurez afectaría directamente el periodo de integración de la GPP estacional, propagando así errores en las estimaciones de rendimiento.

La variabilidad interanual de los rendimientos de trigo modelados y reportados en España durante el periodo 2003–2022 (Figura 3) indica que el marco LUE captura una parte sustancial de las fluctuaciones de productividad de un año a otro. Sin embargo, se observó una desviación notable en 2016, cuando el modelo mostró una subestimación considerable en comparación con los rendimientos reportados.



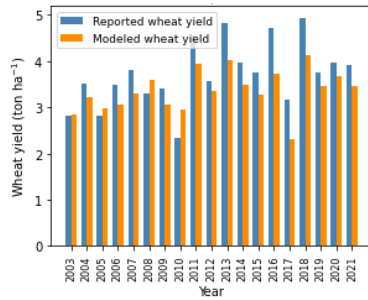


Figura 3. Variabilidad interanual del rendimiento de trigo modelado y reportado en España entre 2003 y 2022

4. CONCLUSIÓN

Se implementó un marco de eficiencia en el uso de la luz (LUE) impulsado por satélite, con resolución temporal diaria y escala espacial de 1 km, para estimar los rendimientos de trigo de secano y regadío en España durante el periodo 2003–2022. La presencia de una subestimación indica limitaciones en la representación del momento fenológico. Estos resultados ponen de manifiesto tanto el potencial como las limitaciones actuales de los enfoques LUE basados en teledetección diaria para la estimación operativa del rendimiento. Aunque la integración del estrés ambiental mediante la Teledetección mejora la coherencia física de las estimaciones de productividad regional, se requiere una mayor precisión en la detección fenológica y en la parametrización del estrés para reforzar la robustez predictiva en entornos agroclimáticos heterogéneos. Dos parámetros específicos del cultivo, HI y ϵ_{max} , aún requieren calibración bajo las condiciones de cultivo en España. Su ajuste es fundamental para mejorar la precisión de las predicciones del modelo. Además, la **temperatura óptima** puede variar según la variedad, lo que resalta la necesidad de una parametrización específica por variedad.

5. FINANCIACIÓN

Este trabajo fue financiado parcialmente por el proyecto DIGISPAC (TED2021-131237B-C22) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

M. Bozorgi recibió una beca predoctoral del IRTA.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España por permitirnos utilizar la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE), la cual ha sido fundamental para el desarrollo de este estudio.

7. REFERENCIAS

Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat

production. *Nature Climate Change*, 5(2). <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>

Curtis, B. C. (2019). Wheat in the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperat el 19 de març de 2026, de <http://www.fao.org/3/y4011e/y4011e04.htm#TopOfPage>

Eklundh, L., & Jönsson, P. (2017). TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing: Software manual. Lund University & Malmö University.

He, M., Kimball, J. S., Maneta, M. P., Maxwell, B. D., Moreno, A., Beguería, S., & Wu, X. (2018). Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused Landsat-MODIS data. *Remote Sensing*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/rs10030372>

Labus, M. P., Nielsen, G. A., Lawrence, R. L., Engel, R., & Long, D. S. (2002). Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 23(20). <https://doi.org/10.1080/01431160110107653>

Lobell, D. B. (2013). The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.008>

Lobell, D. B., Cassman, K. G., & Field, C. B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34. <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.041008.093740>

Mkhabela, M. S., Mkhabela, M. S., & Mashinini, N. N. (2005). Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.006>

Padilla, F. L. M., Maas, S. J., González-Dugo, M. P., Mansilla, F., Rajan, N., Gavilán, P., & Domínguez, J. (2012). Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery. *Field Crops Research*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.025>

Ribeiro, A. F. S., Russo, A., Gouveia, C. M., Pascoa, P., & Pires, C. A. L. (2019). Probabilistic modelling of the dependence between rainfed crops and drought hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12). <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2795-2019>

Yuan, W., Liu, S., Yu, G., Bonnefond, J. M., Chen, J., Davis, K., Desai, A. R., Goldstein, A. H., Gianelle, D., Rossi, F., Suyker, A. E., & Verma, S. B. (2010). Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 114(7). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.01.022>

Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)