

Gómez Candón, D.; Pérez-Méndez, N.; Jimenez-Berni, J.; Catala-Forner, M.; Bellvert, J.; Villegas, D. Evaluación del impacto de diversas estrategias de gestión del agua en el rendimiento del arroz

Evaluación del impacto de diversas estrategias de gestión del agua en el rendimiento del arroz

Gómez Candón, David^{1,2} **Pérez-Méndez, Néstor**³ **Jimenez-Berni, Jose Antonio**⁴
Catala-Forner, Mar³ **Bellvert, Joaquim**⁵ **Villegas, Dolors**¹

¹ CSIC, Aula Dei Experimental Station, Genetics and Plant Production, 50059 Zaragoza, Spain

² ARAID Foundation, 50004 Zaragoza, Spain

³ IRTA, Sustainable Field Crops Program, 43870 Amposta, Spain

⁴ CSIC, Institute for Sustainable Agriculture, 14004 Cordoba, Spain

⁵ IRTA, Efficient Use of Water in Agriculture Program, Fruitcentre, 25003, Lleida, Spain

ORCID: Gómez Candón 0000-0002-4216-6709 Pérez-Méndez 0000-0001-6264-2920 Jimenez-Berni 0000-0001-6542-921X Catala-Forner 0000-0002-1026-7097 Bellvert 0000-0002-9234-7110 Villegas 0000-0003-2961-6346

Correspondencia: david.gomez@csic.es nestor.perez@irta.cat berni@ias.csic.es mar.catala@irta.cat
joaquim.bellvert@irta.cat dvillegas@eead.csic.es

RESUMEN

La gestión sostenible del agua en arrozales mediterráneos requiere identificar prácticas que reduzcan el consumo hídrico sin comprometer el rendimiento. En este estudio se evaluó el impacto de tres estrategias de riego —inundación convencional (CONV), alternancia de inundación y secado (AWD) y drenaje a mitad de estación (MSD)— en dos campañas consecutivas (2022 y 2023), integrando mediciones de rendimiento con teledetección multiespectral y térmica obtenida mediante UAV. El rendimiento mostró un marcado efecto interanual, con valores superiores en 2022. Ese año, CONV y MSD alcanzaron rendimientos similares (9478 y 9303 kg·ha⁻¹), ambos significativamente mayores que AWD (8121 kg·ha⁻¹). En 2023 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Las relaciones entre rendimiento e índices espectrales revelaron que NDRE, GNDVI y, en menor medida, NDVI explican de manera consistente la variabilidad productiva en ambas campañas, destacando su sensibilidad al vigor y contenido de clorofila. MTVI2 mostró un comportamiento sólido en 2023. En cambio, la evapotranspiración no presentó asociaciones suficientemente significativas con el rendimiento, indicando que una única medición térmica no captura adecuadamente la dinámica hídrica acumulada del ciclo. Los resultados sugieren que el drenaje a mitad de temporada (MSD) puede representar una alternativa viable de ahorro de agua sin penalizaciones de rendimiento entre años, mientras que la aplicación de AWD requiere un ajuste cuidadoso para evitar pérdidas productivas en años favorables. La integración de información espectral de alta resolución mediante UAV constituye una herramienta eficaz para evaluar respuestas fisiológicas del cultivo y apoyar la toma de decisiones hacia una gestión hídrica más sostenible.

Palabras clave: Manejo del agua en arroz, Teledetección UAV, Evapotranspiración, Índices de Vegetación

Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 9 febrero 2026

Evaluación del impacto de diversas estrategias de gestión del agua en el rendimiento del arroz



Gómez Candón, David ^(1,2), Pérez-Méndez, Néstor ⁽³⁾, Jimenez-Berni, Jose Antonio ⁽⁴⁾, Catala-Forner, Mar ⁽³⁾, Bellvert, Joaquim ⁽⁵⁾, Villegas, Dolors ⁽¹⁾

⁽¹⁾ CSIC, Aula Dei Experimental Station, Genetics and Plant Production Zaragoza, Spain.


⁽²⁾ ARAID Foundation Zaragoza, Spain.

 0000-0002-4216-6709, david.gomez@csic.es ;  0000-0003-2961-6346, dvillegas@eead.csic.es.


⁽³⁾ IRTA, Sustainable Field Crops Program Amposta, Spain,

 0000-0001-6264-2920, nestor.perez@irta.cat ;  0000-0002-1026-7097, mar.catala@irta.cat.

⁽⁴⁾ CSIC, Institute for Sustainable Agriculture Cordoba, Spain,

 0000-0001-6542-921X, berni@ias.csic.es.

⁽⁵⁾ IRTA, Efficient Use of Water in Agriculture Program, Fruitcentre, Spain,

 0000-0002-9234-7110, joaquim.bellvert@irta.cat.

Resumen: La gestión sostenible del agua en arrozales mediterráneos requiere identificar prácticas que reduzcan el consumo hídrico sin comprometer el rendimiento. En este estudio se evaluó el impacto de tres estrategias de riego —inundación convencional (CONV), alternancia de inundación y secado (AWD) y drenaje a mitad de estación (MSD)— en dos campañas consecutivas (2022 y 2023), integrando mediciones de rendimiento con teledetección multispectral y térmica obtenida mediante UAV. El rendimiento mostró un marcado efecto interanual, con valores superiores en 2022. Ese año, CONV y MSD alcanzaron rendimientos similares (9478 y 9303 kg·ha⁻¹), ambos significativamente mayores que AWD (8121 kg·ha⁻¹). En 2023 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Las relaciones entre rendimiento e índices espectrales revelaron que NDRE, GNDVI y, en menor medida, NDVI explican de manera consistente la variabilidad productiva en ambas campañas, destacando su sensibilidad al vigor y contenido de clorofila. MTVI2 mostró un comportamiento sólido en 2023. En cambio, la evapotranspiración no presentó asociaciones suficientemente significativas con el rendimiento, indicando que una única medición térmica no captura adecuadamente la dinámica hídrica acumulada del ciclo. Los resultados sugieren que el drenaje a mitad de temporada (MSD) puede representar una alternativa viable de ahorro de agua sin penalizaciones de rendimiento entre años, mientras que la aplicación de AWD requiere un ajuste cuidadoso para evitar pérdidas productivas en años favorables. La integración de información espectral de alta resolución mediante UAV constituye una herramienta eficaz para evaluar respuestas fisiológicas del cultivo y apoyar la toma de decisiones hacia una gestión hídrica más sostenible.

Palabras clave: Manejo del agua en arroz, Teledetección UAV, Evapotranspiración, Índices de Vegetación

Assessing the impact of various water management strategies on rice yield

Abstract: Sustainable water management in Mediterranean rice systems requires identifying irrigation strategies that reduce water use without affecting yield. This study assessed the impact of three irrigation practices—conventional flooding (CONV), alternate wetting and drying (AWD), and mid-season drainage (MSD)—over two consecutive seasons (2022 and 2023), integrating grain yield measurements with multispectral and thermal UAV-based remote sensing. Yield exhibited a strong inter-annual effect, with higher values in 2022. In that year, CONV and MSD achieved comparable yields (9478 and 9303 kg·ha⁻¹), both significantly higher than AWD (8121 kg·ha⁻¹). No significant differences among treatments were detected in 2023. Relationships between yield and spectral indices showed that NDRE, GNDVI and, to a lesser extent, NDVI consistently explained variations in productivity across seasons, reflecting their sensitivity to canopy vigor and chlorophyll content. MTVI2 performed well in 2023. Conversely, single-flight estimates of daily evapotranspiration showed no significant relationships with yield, indicating that one-time thermal measurements do not capture the seasonal dynamics of crop water status. Overall, the results suggest that mid-season drainage (MSD) is a promising water-saving strategy that maintains yield stability across years, while AWD requires careful adjustment to avoid yield reductions under favorable conditions. High-resolution UAV multispectral sensing proved

effective for detecting physiological responses of the crop and supports informed decision-making toward more sustainable water management in rice systems.

Keywords: Rice water management, UAV remote sensing, Evapotranspiration, Vegetation indices

1. INTRODUCCIÓN

El arroz ocupa más de 100.000 ha en España, con rendimientos cercanos a $7,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. En un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos, la FAO destaca la mejora genética y la optimización del uso del agua como pilares de una intensificación sostenible (Reeves *et al.*, 2016). En los sistemas mediterráneos, donde el cultivo se desarrolla en zonas inundables próximas al mar, la gestión del riego es crítica tanto para sostener la productividad como para evitar la salinización del suelo (Bouman *et al.*, 2007).

En el delta del Ebro, los arrozales constituyen un agroecosistema de alto valor ecológico integrado en la red Natura 2000, donde las prácticas de manejo influyen en la biodiversidad y en la emisión de gases de efecto invernadero (Martínez-Eixarch *et al.*, 2018). La inundación continua tradicional garantiza la estabilidad productiva, pero implica un elevado consumo hídrico y emisiones significativas de metano. Por ello se han propuesto estrategias alternativas a la inundación convencional (CONV), como alternancia de inundación y secado (AWD) o drenaje a mitad de estación (MSD), capaces de reducir el uso de agua entre un 14% y un 45% sin comprometer necesariamente el rendimiento (Rejesus *et al.*, 2011).

La evaluación del impacto agronómico de estas prácticas requiere herramientas capaces de detectar cambios en el estado fisiológico del cultivo. En este sentido, la teledetección mediante UAV permite monitorizar rasgos biofísicos y térmicos del dosel con alta resolución espacial, constituyendo una vía eficaz para analizar la respuesta del arroz al manejo hídrico. El objetivo de este estudio fue cuantificar los efectos de distintas estrategias de ahorro de agua sobre el rendimiento y explorar el potencial de los índices espectrales y variables derivadas de balance energético para explicar dicha variación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Estrategias de riego en arroz

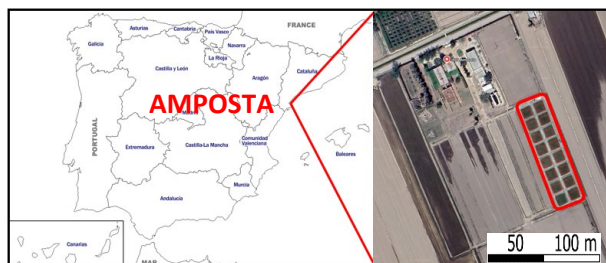


Figura 1. Localización de la parcela de estudio.

Los experimentos se llevaron a cabo en las instalaciones del IRTA en Am postá (Tarragona, España) durante los años 2022 y 2023 (Figura 1). El experimento consistió en quince parcelas de arroz de $25 \times 10 \text{ m}$ dispuestas en bloques completos aleatorios con 5 réplicas (Figura 2).

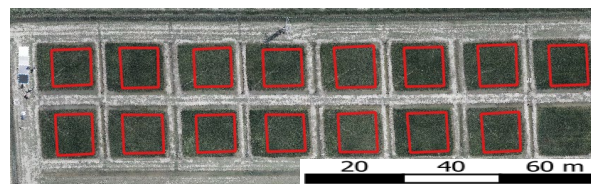


Figura 2. Parcelas de arroz utilizadas en el estudio.

Se aplicaron tres prácticas de gestión del agua: CONV, AWD y MSD. El rendimiento del arroz se estimó como el producto de los granos por panícula por la densidad de plantas.

2.2. Teledetección

Para evaluar el efecto del estrés hídrico en el cultivo de arroz, se emplearon imágenes multiespectrales y térmicas. A partir de estos datos, se estimaron distintos rasgos fisiológicos relacionados con el estado hídrico del cultivo, utilizando índices espectrales y modelos de balance energético. Los vuelos se realizaron el 12 de julio de 2022 y el 18 de julio de 2023, en las horas centrales del día, utilizando un UAV DroneHexa equipado con una cámara térmica FLIR A655sc y un sensor multiespectral MicaSense RedEdge-P (Micasense, Seattle, EE. UU.). Este último proporciona cinco bandas espectrales centradas en $475 \pm 32 \text{ nm}$ (Blue), $560 \pm 27 \text{ nm}$ (Green), $668 \pm 14 \text{ nm}$ (Red), $717 \pm 12 \text{ nm}$ (Red Edge) y $842 \pm 57 \text{ nm}$ (NIR), alcanzando una resolución espacial de $0,002 \text{ m}$. Previo a cada vuelo, se colocaron paneles de referencia en tierra para la calibración radiométrica y la corrección térmica.

Tabla 1. Índices de vegetación utilizados en el estudio.

Acrónimo	Ecuación	Autor
NDVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Sellers, 1985
GNDVI	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Ma <i>et al.</i> , 1996
NDRE	$\frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$	Fitzgerald <i>et al.</i> , 2006
MTVI2	$\frac{1.5[1.2(NIR - Green) - 2.5(Red\ Edge - Green)]}{\sqrt{(2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{Red\ Edge})} - 0.5}$	Yao <i>et al.</i> , 2017

El procesado inicial consistió en convertir los valores digitales a reflectancia empleando las mediciones del panel de calibración. Posteriormente, las imágenes calibradas se reconstruyeron en ortomosaicos mediante aerotriangulación en PIX4Dmapper© v4.6.4 (PIX4D S.A., Prilly, Suiza). El análisis posterior se realizó en QGIS v3.34.8, donde se aplicó una clasificación supervisada para separar píxeles de vegetación y agua, conservando únicamente los correspondientes a vegetación pura. Para cada parcela se extrajeron tanto la temperatura superficial del dosel como la reflectancia de cada banda. Se seleccionaron cuatro índices de vegetación relacionados con el vigor de las plantas y el contenido de clorofila (Tabla 1), en particular NDVI (*Normalized*

Difference VI), GNDVI (Green Normalized Difference VI), NDRE (Normalized Difference VI) y MTVI2 (Improved Modified Triangular VI). Por último, se combinaron los datos de temperatura con los parámetros biofísicos de los cultivos y la información meteorológica para estimar la evapotranspiración diaria de los cultivos (ET diaria) mediante el modelo de balance energético de dos fuentes TSEB (Norman *et al.*, 1995).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Índices y parámetros biofísicos

Respecto a los índices de vegetación, el NDVI mostró valores elevados y similares entre tratamientos en ambos años (Figura 3). Este comportamiento es coherente con la conocida saturación del NDVI en cultivos de alto vigor, lo que limita su capacidad para discriminar diferencias sutiles en la estructura o contenido de clorofila. El GNDVI, en cambio, mostró mayor sensibilidad, especialmente en 2023, con diferencias claras entre tratamientos (Figura 3). Este índice, más relacionado con el contenido de clorofila y la absorción en el verde, parece captar mejor la respuesta fisiológica del cultivo a la variación de las condiciones hídricas.

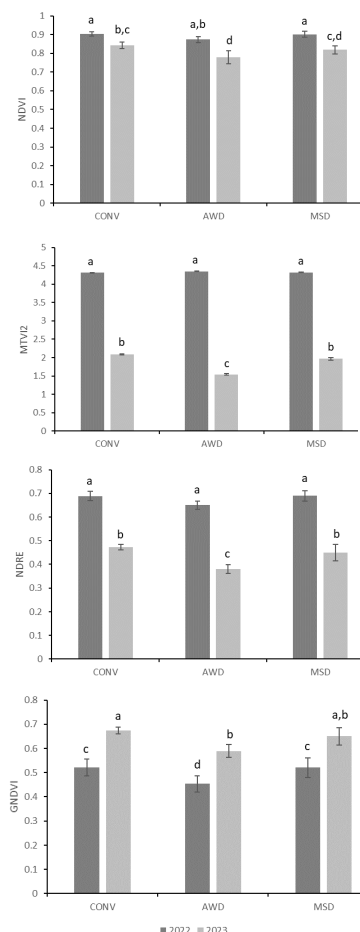


Figura 3. Índices de vegetación por tratamiento. 2022 y 2023. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos y fechas (test de Duncan, $\alpha = 0,05$).

Por otro lado, se observó un comportamiento similar en la ET, encontrando diferencias significativas entre años, pero no entre tratamientos (Figura 4). Esto sugiere que, bajo las condiciones experimentales, las estrategias de

manejo del agua no indujeron un estrés hídrico suficientemente severo como para generar diferencias detectables por el modelo TSEB. En 2022 se observaron los mayores valores de ET, que podrían explicarse por una mayor demanda evaporativa y unas temperaturas más elevadas durante los vuelos. Esto concuerda con la sensibilidad del TSEB a la radiación neta y al déficit de presión de vapor. La ausencia de diferencias claras entre tratamientos indica que tanto AWD como MSD son estrategias capaces de mantener la transpiración del cultivo en niveles comparables al manejo convencional, al menos en las fechas de adquisición analizadas.

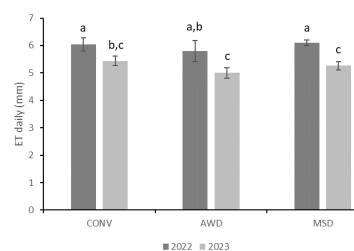


Figura 4. ET por tratamiento para los vuelos de 2022 y 2023. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos y fechas (test de Duncan, $\alpha = 0,05$).

3.2. Rendimiento

Respecto al rendimiento a 14% de humedad, éste se analizó por campaña mediante un diseño en bloques completos al azar, ajustando el efecto de bloque dentro de cada año para obtener medias marginales (LSMeans) comparables entre tratamientos (Figura 5). En 2022, las LSMMeans mostraron un desempeño elevado y relativamente homogéneo entre el manejo convencional y el drenaje a mitad de temporada: CONV alcanzó 9478 kg·ha⁻¹ (IC95%: 8752–10205) y MSD 9303 kg·ha⁻¹, mientras que AWD se situó en 8121 kg·ha⁻¹. Por otro lado, la comparación múltiple de Tukey ($\alpha=0,05$) separó CONV y MSD en un grupo distinto a AWD, lo que indica que, bajo las condiciones de 2022, la alternancia de inundación y secado resultó en un rendimiento significativamente inferior al de la inundación continua y al drenaje de mitad de campaña (MSD = 1272 kg·ha⁻¹).

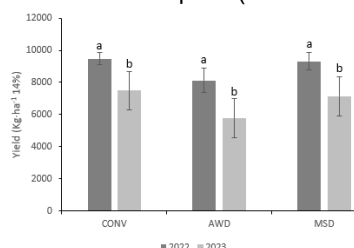


Figura 5. Rendimiento (Yield) por tratamiento. 2022 y 2023. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos y fechas (test de Duncan, $\alpha = 0,05$).

En 2023, el rendimiento medio disminuyó en los tres tratamientos, con CONV en 7490 kg·ha⁻¹, MSD en 7139 kg·ha⁻¹ y AWD en 5773 kg·ha⁻¹. Sin embargo, la prueba de Tukey no detectó diferencias significativas entre tratamientos ese año (todas las estrategias en el grupo A, HSD = 2627 kg·ha⁻¹), lo que sugiere que la variabilidad interanual asociada a las condiciones ambientales y a la demanda evaporativa condicionó el nivel productivo, homogeneizando el efecto relativo de las estrategias de

riego sobre el rendimiento. En conjunto, los resultados confirman un efecto dominante del año sobre la producción y muestran que MSD mantiene rendimientos comparables al manejo convencional en ambas campañas, mientras que AWD requiere un ajuste fino del momento y profundidad de los periodos de secado para evitar mermas en años favorables como 2022. Esta evidencia respalda la viabilidad agronómica de MSD como práctica de ahorro de agua sin penalizaciones consistentes de rendimiento entre campañas, y sugiere que AWD puede ser igualmente viable si se calibra su implementación a las condiciones ambientales del ciclo.

3.3. Relación rendimiento y teledetección

Para evaluar la capacidad de distintos indicadores de teledetección para explicar la variabilidad del rendimiento del arroz, se analizó la relación entre el rendimiento (kg/ha al 14% de humedad) y las cinco variables derivadas de los datos remotos obtenidos.

Tabla 2. Índices de vegetación utilizados en el estudio.

Variable	r parcial (año y tratamiento)	p_value	n
NDVI	0.428	0.0184	30
GNDVI	0.552	0.0015	30
NDRE	0.591	0.0006	30
MTVI2	0.478	0.0076	30
ET	0.343	0.0636	30

Controlando el efecto del año y tratamiento (principales fuentes de variación estructural), los resultados revelaron patrones consistentes (Tabla 2) donde NDRE emergió como el predictor más robusto (r parcial = 0.591; p = 0.0006) junto con el GNDVI mostró también una asociación (r = 0.552; p = 0.0015). Además, MTVI2 (r = 0.478; p = 0.0076) y NDVI (r = 0.428; p = 0.0184) mostraron asociaciones significativas. Por otro lado, la ET diaria quedó en el umbral de significación (r = 0.343; p = 0.0636). Estos resultados confirman que, tras corregir por la variabilidad externa, los índices de vegetación explican mejor el rendimiento que las variables térmicas puntuales. En conjunto, estos resultados muestran que los índices basados en Red Edge y banda verde capturan mejor las variaciones en vigor y estado fisiológico asociadas al rendimiento, mientras que la señal térmica puntual es insuficiente para representar la dinámica hídrica acumulada del ciclo.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el efecto de tres estrategias de manejo del agua en el cultivo del arroz (CONV, AWD y MSD), combinando mediciones agronómicas con teledetección multispectral y térmica obtenida mediante UAV. Los resultados mostraron un marcado efecto interanual, con rendimientos más altos en 2022 que en 2023. En 2022, los rendimientos de CONV y MSD fueron superiores a los de AWD significativamente, según las comparaciones múltiples de Tukey basadas en LSMMeans ajustadas por bloque, mientras que en 2023 no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados indican que el drenaje a mitad de estación constituye una alternativa sólida de ahorro de agua sin penalización productiva entre campañas, mientras que la alternancia de inundación y secado puede requerir ajustes precisos para evitar reducciones de rendimiento en años de alto potencial. La relación entre el rendimiento y los índices espectrales

confirmó que los indicadores basados en las bandas Red Edge (NDRE) y Verde (GNDVI) fueron los predictores más consistentes del rendimiento, incluso después de controlar el efecto del año y del bloque mediante correlaciones parciales. El NDVI también mostró capacidad explicativa, aunque su eficacia disminuyó en 2023, probablemente debido a la saturación causada por el alto vigor vegetal. Por su parte, MTVI2 presentó un buen comportamiento en 2023. Por el contrario, las estimaciones puntuales de la evapotranspiración diaria (ET) y la temperatura del dosel, derivadas de un único vuelo, no mostraron una relación significativa con el rendimiento, lo que sugiere que la dinámica hídrica estacional no puede capturarse adecuadamente mediante medidas térmicas aisladas. En general, los resultados demuestran que la teledetección UAV, especialmente a través de índices espectrales sensibles al vigor y la clorofila, es una herramienta eficaz para evaluar la respuesta del arroz a las estrategias de manejo hídrico y apoyar la toma de decisiones orientada hacia una gestión más sostenible del recurso agua.

5. AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de los proyectos PID2020-118650RR-C33 (CERESTRÉS) y PID2023-149687OR-C32 (MERCEDES) MICIU/AEI/10.13039/501100011033

6. REFERENCIAS

- Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., Barker, R. (2007) *Rice and Water. Advances in Agronomy. Academic Press.* pp. 187–237
- Fitzgerald, G. J., Rodriguez, D., Christensen, L. K., Belford, R., Sadras, V. O., Clarke, T. R. (2006). Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agriculture*, 7, 233–248
- Ma, B.L.; Morrison, M.J.; Dwyer, L.M. (1996) Canopy light reflectance and field greenness to assess nitrogen fertilization and yield of maize. *Agron. J.* 88, 915–920
- Martínez-Eixarch, M., Alcaraz, C., Viñas, M., Noguerol, J., Aranda, X., Prenafeta-Boldú, F.X. (2018) Correction: Neglecting the fallow season can significantly underestimate annual methane emissions in Mediterranean rice fields. *PLoS One*. 13: e0202159
- Norman, J. M., Kustas, W. P., Humes, K. S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temp. *Agric. Forest Meteorol.* 77, 263–293
- Reeves, T., Thomas, G., Ramsay, G. (2016) *Save and grow in practice: maize, rice, wheat. A guide to sustainable cereal production (FAO UN, 2016)*
- Rejesus, R.M., Palis, F.G., Rodriguez, D.G.P., Lampayan, R.M., Bouman, B.A.M. (2011) Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. *Food Policy.* pp. 280–288
- Sellers, P.J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 6, 1335–1372
- Yao, X., Wang, N., Liu, Y., Cheng, T., Tian, Y., Chen, Q., et al. (2017). Estimation of wheat LAI at middle to high levels using UAV narrowband multispectral imagery. *Remote Sens.* 9:1304.