

Torres-Vázquez, M.; Oliva, P.; Solano-Romero, E.; Pampanoni, V.; Franquesa, M.; Chuvieco, E. Estimación del peligro de incendio con índices de humedad y de sequía meteorológica: experiencias de los grandes incendios de 2025

Estimación del peligro de incendio con índices de humedad y de sequía meteorológica: experiencias de los grandes incendios de 2025

Torres-Vázquez, Miguel Ángel¹ Oliva, Patricia¹ Solano-Romero, Erika¹ Pampanoni, Valerio² Franquesa, Magí³ Chuvieco, Emilio¹

¹ Environmental Remote Sensing Research Group, Department of Geology, Geography and the Environment, Universidad de Alcalá, Calle Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares, Spain

² School of Aerospace Engineering, Sapienza University, 00138 Rome, Italy

³ Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Zaragoza, 50059, Spain

ORCID: Torres-Vázquez 0000-0001-8897-9337 Oliva 0000-0001-5051-3662 Solano-Romero 0009-0009-7040-1161 Pampanoni 0000-0002-9946-1303 Franquesa 0000-0003-3101-0394 Chuvieco 0000-0001-5618-4759

Correspondencia: miguela.torres@uah.es patricia.oliva@uah.es erika.solano@uah.es valerio.pampanoni@uniroma1.it magifranquesa@gmail.com emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

El aumento reciente de grandes incendios bajo condiciones de sequía intensa ha reforzado la necesidad de contar con indicadores espaciales y actualizables del estado hídrico del combustible. En este estudio se evaluó la utilidad del Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), derivado de Sentinel-3, para caracterizar las condiciones previas a incendios extremos, comparándolo con el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración a 3 meses (SPEI-3) como referencia de sequía meteorológica. El análisis se centró en diez grandes incendios (>10.000 ha) ocurridos en agosto de 2025 en el sector noroccidental de la península Ibérica. Se compararon tres ámbitos espaciales: el interior de los perímetros quemados, un buffer externo de 5 km y zonas alejadas utilizadas como control. Los resultados muestran un deterioro sostenido de las condiciones hídricas durante el verano. El SPEI-3 evolucionó hacia valores más negativos, alcanzando niveles severos a extremos (≤ -2) en las dos últimas semanas de agosto. El NDWI descendió gradualmente desde junio y presentó una caída abrupta al final de agosto dentro de los perímetros, más moderada en el buffer y menos marcada en las zonas alejadas. La relación entre NDWI y SPEI-3, evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, fue mayor en los perímetros (0,68) y en el buffer (0,64) que en las zonas alejadas (0,51).



Palabras clave: Incendios forestales, índices de humedad, sequía, Sentinel-3

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

Estimación del peligro de incendio con índices de humedad y de sequía meteorológica: experiencias de los grandes incendios de 2025


Torres-Vázquez, Miguel Ángel ⁽¹⁾, Oliva, Patricia ⁽¹⁾, Solano-Romero, Erika ⁽¹⁾, Pampanoni, Valerio ⁽²⁾, Franquesa, Magí ⁽³⁾, Chuvieco, Emilio ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Environmental Remote Sensing Research Group, Department of Geology, Geography and the Environment, Universidad de Alcalá, Spain.


 0000-0001-8897-9337, miguela.torres@uah.es ;  0000-0001-5051-3662, patricia.oliva@uah.es

 0009-0009-7040-1161, erika.solano@uah.es ;  0000-0001-5618-4759, emilio.chuvieco@uah.es

⁽²⁾ School of Aerospace Engineering, Sapienza University Rome, Italy.

 0000-0002-9946-1303, valerio.pampanoni@uniroma1.it

⁽³⁾ Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Spain.

 0000-0003-3101-0394, magifranquesa@gmail.com

Resumen: El aumento reciente de grandes incendios bajo condiciones de sequía intensa ha reforzado la necesidad de contar con indicadores espaciales y actualizables del estado hídrico del combustible. En este estudio se evaluó la utilidad del Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), derivado de Sentinel-3, para caracterizar las condiciones previas a incendios extremos, comparándolo con el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración a 3 meses (SPEI-3) como referencia de sequía meteorológica. El análisis se centró en diez grandes incendios (>10.000 ha) ocurridos en agosto de 2025 en el sector noroccidental de la península Ibérica. Se compararon tres ámbitos espaciales: el interior de los perímetros quemados, un buffer externo de 5 km y zonas alejadas utilizadas como control. Los resultados muestran un deterioro sostenido de las condiciones hídricas durante el verano. El SPEI-3 evolucionó hacia valores más negativos, alcanzando niveles severos a extremos (≤ -2) en las dos últimas semanas de agosto. El NDWI descendió gradualmente desde junio y presentó una caída abrupta al final de agosto dentro de los perímetros, más moderada en el buffer y menos marcada en las zonas alejadas. La relación entre NDWI y SPEI-3, evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, fue mayor en los perímetros (0,68) y en el buffer (0,64) que en las zonas alejadas (0,51).

Palabras clave: Incendios forestales, índices de humedad, Índices de sequía, Sentinel-3

Estimating fire danger using moisture indices and meteorological drought indices: experiences from the large 2025 wildfires

Abstract: The recent increase in large wildfires under intense drought conditions has reinforced the need for spatially explicit and updatable indicators of fuel water status. This study assessed the usefulness of the Normalized Difference Water Index (NDWI), derived from Sentinel-3, for characterizing pre-fire conditions associated with extreme wildfires, and compared it with the 3-month Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI-3) as a reference indicator of meteorological drought. The analysis focused on ten large wildfires (>10,000 ha) that occurred in August 2025 in the northwestern sector of the Iberian Peninsula. Three spatial domains were compared: the interior of the burned perimeters, a 5-km external buffer, and distant areas used as controls. The results show a sustained deterioration of hydric conditions during the summer. SPEI-3 evolved towards more negative values, reaching severe to extreme levels (≤ -2) during the last two weeks of August. NDWI decreased gradually from June onward and showed an abrupt drop at the end of August within the perimeters, more moderate in the buffer and less pronounced in the distant areas. The relationship between NDWI and SPEI-3, assessed using Pearson's correlation coefficient, was stronger within the perimeters (0.68) and in the buffer (0.64) than in the distant areas (0.51).

Keywords: Wildfires, moisture indices, drought indices, Sentinel-3

1. INTRODUCCIÓN

Si bien a escala global existe cierto consenso sobre la reducción de la superficie afectada por incendios (Andela *et al.*, 2017), también parece evidenciarse un incremento de los incendios extremos y catastróficos, asociado a condiciones climáticas anómalas, en particular olas de calor y sequías extremas (Cunningham *et al.*, 2024). Estas temporadas representan un desafío creciente para reducir la vulnerabilidad social y ambiental ante estos eventos. Para ello, es necesario mejorar la capacidad de predecir estas situaciones, tanto a medio plazo, atendiendo a los factores estructurales de riesgo, como a corto plazo, considerando los aspectos meteorológicos (Torres-Vázquez *et al.*, 2025). Además, la evaluación del riesgo debe considerar no sólo el peligro, sino también la vulnerabilidad y la exposición, desde una perspectiva holística (Chuvieco *et al.*, 2023). En este contexto, la teledetección resulta de gran interés, ya que proporciona información espacialmente completa y en tiempos relativamente cortos, tanto para la evaluación pre-incendio como para el análisis de sus consecuencias (Chuvieco *et al.*, 2020).

La temporada de incendios del verano de 2025 en la península Ibérica puso de manifiesto las limitaciones de los sistemas actuales de evaluación del riesgo y la necesidad de contar con herramientas de teledetección capaces de monitorizar los incendios activos y las áreas recientemente quemadas. La magnitud de los incendios registrados, con miles de personas desplazadas y valores históricos de superficie quemada, confirmó la necesidad de disponer de información actualizada, precisa y completa para comprender mejor estos episodios y apoyar la gestión de su evolución y recuperación posterior (Sánchez-Hernández *et al.*, 2025).

Entre los principales factores de peligro destacan la humedad y la cantidad de combustible, la probabilidad de ignición y las condiciones topográficas. Sin embargo, la evaluación actual del riesgo se basa todavía en gran medida en variables meteorológicas y no incorpora de forma suficiente información sobre el estado y la dinámica del combustible. Por ello, resulta necesario mejorar la estimación del peligro mediante métodos que proporcionen información fiable y espacialmente completa sobre el contenido de humedad del combustible (FMC, por sus siglas en inglés). Aunque el FMC puede estimarse a partir de variables meteorológicas o mediante mediciones directas en campo, ambos enfoques presentan limitaciones (Ruffault *et al.*, 2018; Yebra *et al.*, 2019). Frente a ello, las observaciones satelitales ofrecen una alternativa sólida, basada principalmente en la absorción del agua en el infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) y, en menor medida, en el infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés; Yebra *et al.*, 2013, 2024).

El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de los índices de humedad derivados de imágenes de satélite para predecir el riesgo de incendios extremos, utilizando como caso de estudio los grandes incendios que afectaron al sector noroccidental de la península Ibérica en agosto de 2025. Asimismo, se compara su capacidad predictiva con la de otros indicadores de sequía, en

particular el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) propuesto por Vicente-Serrano *et al.* (2010).

2. MÉTODOS

Para analizar el impacto de los grandes incendios del verano de 2025, se delimitaron los perímetros a partir de datos Sentinel-3 y se seleccionaron únicamente los eventos con una superficie superior a 10.000 ha. Posteriormente, los polígonos se recortaron al límite administrativo de España. La Figura 1 muestra la localización de los incendios analizados y los tres ámbitos de estudio definidos a partir de esta cartografía: (i) el interior de los perímetros (área quemada), (ii) un buffer externo de 5 km alrededor de cada perímetro, excluyendo la superficie quemada, y (iii) áreas alejadas en las provincias de Soria, Burgos y Teruel, seleccionadas como zonas de control por situarse fuera de la influencia directa de los incendios analizados. En los tres ámbitos se consideraron los tipos de combustible (FT, por sus siglas en inglés) elaborados por Aragonese *et al.* (2023). En las áreas alejadas se aplicó, además, un muestreo aleatorio estratificado del 30% de las celdas según las clases de FT.

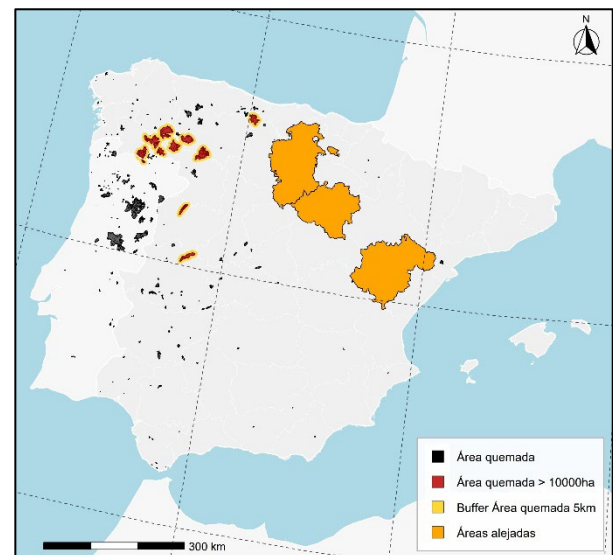


Figura 1. Localización de los incendios registrados durante el verano de 2025 en la península ibérica (en negro), de los incendios de más de 10.000 ha seleccionados en España (en rojo), de sus áreas buffer externas (en amarillo) y de las áreas distantes utilizadas como zonas de control (en naranja).

El contexto meteorológico se evaluó mediante el índice SPEI a escala de tres meses (SPEI-3), utilizando datos semanales en formato NetCDF del Monitor de Sequía Meteorológica del CSIC, correspondientes al periodo entre la primera semana de junio y la última de agosto de 2025 (12 pasos temporales; véase <https://monitordesequia.csic.es/monitor/>). La respuesta de la vegetación se representó mediante el Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI, por sus siglas en inglés), empleado como indicador de cambios en el contenido hídrico de la vegetación y, de forma indirecta, en la humedad del combustible (Gao, 1996):

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

Para su cálculo se utilizaron mosaicos Sentinel-3 Synergy/SLSTR en geometría nadir, con las bandas S3N (865 nm; NIR) y S5N (1,61 μ m; SWIR1), disponibles como compuestos de 8 días. Cuando fue necesario, tanto el NDWI como el SPEI-3 se re proyectaron a la rejilla FT mediante interpolación bilineal. Después, ambas variables se enmascararon según las tres zonas de análisis y se extrajeron valores por celda y clase de FT para su análisis temporal y comparación espacial. Cada compuesto de NDWI se emparejó con el valor semanal de SPEI-3 más próximo, con una tolerancia de ± 1 día. La relación entre ambas variables se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson. El conjunto final incluyó 10 perímetros, asociados principalmente a incendios ocurridos en las dos últimas semanas de agosto de 2025. Por ello, las series temporales abarcan tanto el periodo pre-incendio, desde comienzos de junio, como la fase de impacto directo del fuego a finales de agosto. Dado el tamaño de píxel de Sentinel-3, los valores de NDWI dentro de los perímetros pueden verse afectados por píxeles mixtos. En consecuencia, parte de la variabilidad observada puede reflejar no solo cambios en la humedad del combustible, sino también diferencias en la composición y fenología de la vegetación.

3. RESULTADOS

En los 10 perímetros de incendio, la clase de cobertura vegetal dominante fue matorral alto (~26%), seguida de turbera herbácea (~20%), pastizal bajo (~16%) y turbera forestal (~15%). El cultivo de cereal aportó ~7%,

mientras que el resto de las clases individuales registró porcentajes inferiores. La Figura 2 muestra, para cuatro clases FT (bosque frondoso caducifolio cerrado, bosque de coníferas perennifolio cerrado, turbera herbácea y matorral alto), la evolución semanal (12 semanas; junio-agosto) del NDWI (paneles a-d) y del SPEI-3 (paneles e-h) en tres zonas: perímetros, buffer de 5 km y áreas distantes. El NDWI descendió de forma gradual desde junio en las tres zonas, pero mostró una caída abrupta en las dos últimas fechas de agosto (17 y 24) dentro de los perímetros, visible en todas las coberturas. En el buffer de 5 km, ese descenso final fue más moderado, mientras que las áreas distantes mantuvieron valores relativamente más estables. Por su parte, el SPEI-3 mostró una progresión hacia valores más negativos a lo largo del periodo, con un empeoramiento marcado en las dos últimas semanas, cuando perímetros y buffer alcanzaron valores excepcionalmente extremos (SPEI-3 ≤ -2), mientras que en las áreas distantes persistió una sequía moderada.

La correlación de Pearson entre NDWI y SPEI-3 se calculó por celda y se resumió como promedio por zona y tipo de cubierta. Considerando todas las coberturas, la asociación fue mayor en el interior de los perímetros (0,68) y en el buffer de 5 km (0,64) que en las zonas distantes (0,51). Por clases, destacaron valores altos en cereal (0,82 en perímetros), matorral alto (0,74 en perímetros; 0,71 en buffer) y bosque frondoso caducifolio cerrado (0,70 en perímetros; 0,68 en buffer). En contraste, la asociación fue muy débil en turbera forestal en zonas distantes (0,09) y baja o negativa en bosque de coníferas perennifolio cerrado en zonas distantes (-0,19).

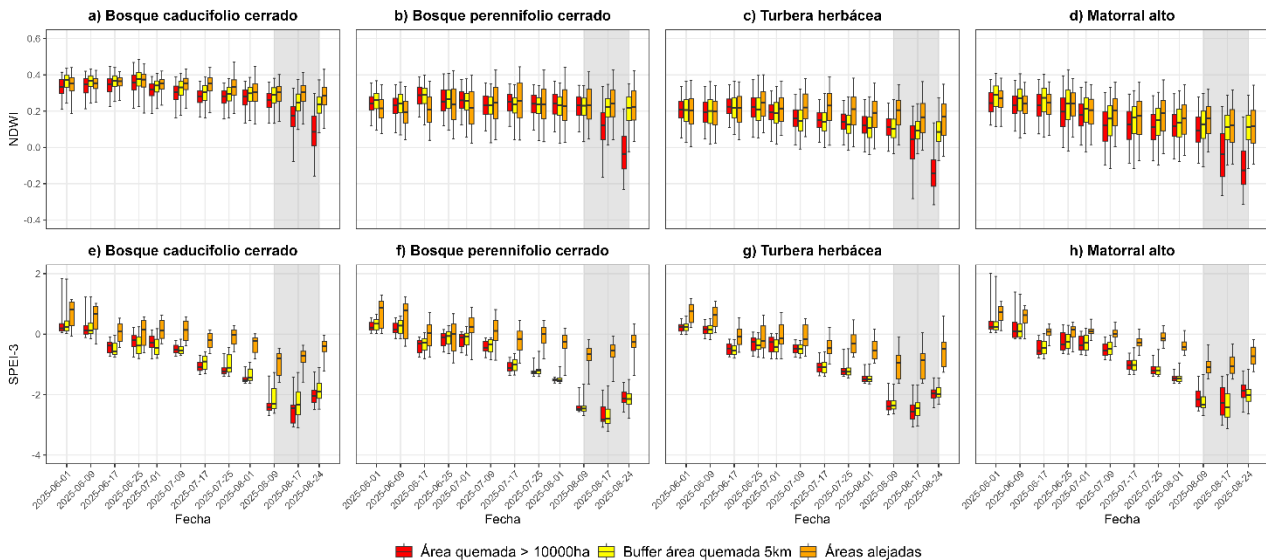


Figura 2. Distribución temporal del Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI; paneles a-d) y del Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración a 3 meses (SPEI-3; paneles e-h) en cuatro clases FT (según Aragonese *et al.*, 2023) y tres zonas (perímetros de área quemada, buffer de 5 km y áreas lejanas). Las cajas representan el rango intercuartílico (P25-P75), la línea central indica la mediana y los bigotes corresponden a los percentiles 2,5 y 97,5. El sombreado gris señala el periodo con incendios, aproximadamente entre el 9 y el 24 de agosto de 2025.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En conjunto, los grandes incendios de finales de agosto de 2025 se desarrollaron bajo condiciones de sequía meteorológica severa a extrema, acompañadas por un descenso progresivo del NDWI, lo que refuerza el interés de combinar indicadores meteorológicos y de teledetección para caracterizar situaciones favorables a incendios extremos. La mayor correlación NDWI-SPEI-3 en los perímetros y en el buffer de 5 km sugiere un acoplamiento más estrecho entre el forzamiento atmosférico y la respuesta de la vegetación en las zonas más próximas a los incendios, mientras que la menor asociación en áreas distantes y en algunas coberturas forestales apunta a la influencia adicional de factores estructurales, fenológicos y espaciales, así como a una respuesta más amortiguada del dosel frente al déficit hídrico. Asimismo, el patrón temporal observado indica que los descensos más acusados del SPEI-3 tienden a preceder a los del NDWI, lo que resulta coherente con un cierto retardo en la respuesta de la vegetación frente a la sequía (Vicente-Serrano *et al.*, 2013). No obstante, la evidencia es correlacional y no permite establecer causalidad, ya que la ocurrencia y propagación del fuego dependen también de la ignición, la meteorología de corta escala y la estructura y continuidad del combustible. Futuros trabajos deberían explorar distintas escalas de acumulación de la sequía (por ejemplo, 1, 6 y 12 meses), así como incorporar métricas más directas del estado del combustible, como el contenido de humedad del combustible vivo (LFMC, por sus siglas en inglés), para mejorar la interpretación del vínculo entre sequía, disponibilidad de combustible y peligro de incendio (Yebra *et al.*, 2013, 2024).

5. AGRADECIMIENTOS

Proyecto FireCCI de la Agencia Espacial Europea (ESA), número de contrato 4000126706/19/i-nb

6. REFERENCIAS

- Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Chen, Y., van der Werf, G. R., Kasibhatla, P. S., ... & Randerson, J. T. (2017). A human-driven decline in global burned area. *Science*, *356*(6345), 1356-1362. <https://doi.org/10.1126/science.aal4108>
- Aragoneses, E., García, M., Salis, M., Ribeiro, L. M., & Chuvieco, E. (2023). Classification and mapping of European fuels using a hierarchical, multipurpose fuel classification system. *Earth System Science Data*, *15*(3), 1287-1315. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1287-2023>
- Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J., García, M., Yebra, M., & Oliva, P. (2020). Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management. *Current Forestry Reports*, *6*(2), 81-96. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00116-5>
- Chuvieco, E., Yebra, M., Martino, S., Thonicke, K., Gómez-Giménez, M., San-Miguel, J., ... & Viegas, D. (2023). Towards an integrated approach to wildfire risk assessment: when, where, what and how may the landscapes burn. *Fire*, *6*(5), 215. <https://doi.org/10.3390/fire6050215>
- Cunningham, C. X., Williamson, G. J., & Bowman, D. M. (2024). Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. *Nature ecology & evolution*, *8*(8), 1420-1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>
- Gao, B. C. (1996). NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257-266. [10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Ruffault, J., Martin-StPaul, N., Pimont, F., & Dupuy, J. L. (2018). How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *262*, 391-401. [10.1016/j.agrformet.2018.07.031](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.031)
- Sánchez Hernández, G., Turco, M., Repeto Deudero, I., Royé, D., Baudena, M., Montávez, J. P., Pietroiusti, R., Provenzale, A., Santin, C., Torres Vázquez, M. Á., & Pausas, J. G. (2025). Record breaking 2025 European wildfires concentrated in Northwest Iberia. *Global Change Biology*, *31*(12), e70649. <https://doi.org/10.1111/gcb.70649>
- Torres-Vázquez, M. Á., Herrera, S., Gincheva, A., Halifa-Marín, A., Cavicchia, L., Di Giuseppe, F., ... & Turco, M. (2025). Enhancing seasonal fire predictions with hybrid dynamical and random forest models. *npj Natural Hazards*, *2*(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s44304-025-00069-4>
- Vicente Serrano, S. M., Beguería, S., & López Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., ... & Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(1), 52-57. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>
- Yebra, M., Dennison, P. E., Chuvieco, E., Riaño, D., Zylstra, P., Hunt Jr, E. R., ... & Jurdao, S. (2013). A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*, *136*, 455-468. [10.1016/j.rse.2013.05.029](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.029)
- Yebra, M., Scortechini, G., Badi, A., Beget, M. E., Boer, M. M., Bradstock, R., ... & Ustin, S. (2019). Globe-LFMC, a global plant water status database for vegetation ecophysiology and wildfire applications. *Scientific data*, *6*(1), 155. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0164-9>
- Yebra, M., Scortechini, G., Adeline, K., Aktepe, N., Almoustafa, T., Bar-Massada, A., ... & Younes Cardenas, N. (2024). Globe-LFMC 2.0, an enhanced and updated dataset for live fuel moisture content research. *Scientific data*, *11*(1), 332. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03159-6>