



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Seguimiento de humedad de combustible fino vivo mediante satélites de alta resolución temporal: aplicaciones a la mejora de los índices de riesgo en Sierra Morena (Córdoba)

SILLERO ALMAZÁN, J. M.¹; MONTES PITA, F.¹; ESPINOSA PRIETO, J.; DÍEZ GALILEA, C.¹; GUIJARRO GUZMÁN, M.¹; HERNANDO LARA, C.¹; DE PAULA PELÁEZ, S.¹; NICOLÁS GUIJOSA, S.¹; CANTALEJO COSERRÍA, A.²; SENRA RIVERO, F.³; MADRIGAL OLMO, J.^{1,2}

¹ Centro de Investigación Forestal CIFOR-INIA (CSIC).

² ETSI Montes UPM.

³ Agencia de Medio Ambiente y Aguas, Junta de Andalucía (AMAYA)

Resumen

En el contexto del proyecto INTERREG POCTEP CILIFO, el grupo de investigación de Incendios del INIA (CSIC) viene realizando en Sierra Morena, en la provincia de Córdoba, un control periódico del contenido de humedad del combustible vivo (LFMC) en jarales de *Cistus ladanifer*, con el ánimo de establecer una metodología para el seguimiento del LFMC con datos satelitales de alta resolución temporal, aplicable al Plan de Prevención y Extinción de Incendios de Andalucía (INFOCA) a cargo de la Agencia de Medio Ambiente y Aguas, Junta de Andalucía (AMAYA). Se emplearon datos de Sentinel-2 y MODIS para el análisis multitemporal mediante el empleo de krigeado espacio-temporal. Se estudió la correlación con los datos de campo para seleccionar los modelos que se comporten mejor en la zona de estudio. Finalmente, se generaron mapas de predicción de LFMC empleando los modelos obtenidos.

Palabras clave

Riesgo de incendio, análisis geoespacial, percepción remota, reflectancia, GIS.

1. Introducción

El conocimiento del contenido de humedad del combustible forestal resulta fundamental para determinar su disponibilidad para arder, y cuánto se consumiría en un incendio. El del combustible muerto depende directamente de las condiciones meteorológicas, con una velocidad de cambio en función de su grosor. En cambio, el contenido de humedad del combustible vivo tiende a mostrar tasas de cambio más bajas y responde a fenómenos fisiológicos complejos que se producen como consecuencia de la interacción entre la vegetación y su medio, dentro del sistema suelo-planta-atmósfera. Este estudio se centra en la estimación de la humedad del combustible vivo mediante percepción remota.

La estimación de la humedad del combustible fino vivo (*Live Fuel Moisture Content*, LFMC en la literatura anglosajona) sigue siendo un reto abordado por diversos grupos de investigación en distintos países (e.g. YEBRA et al. 2013) y también está siendo objeto de resultados recientes en España (e.g. MARINO et al. 2020). La disponibilidad de cada vez mejores series de datos de campo de esta variable en España, promovido por algunas comunidades autónomas, está permitiendo la posibilidad de establecer correlaciones robustas con datos procedentes de sensores remotos. La obtención de dichos modelos abre la puerta a la inclusión de estos resultados en la mejora de la modelización de combustibles, añadiéndoles un carácter dinámico, hasta ahora no disponible, y por otro lado ofrecer el estado fisiológico y de humedad de los combustibles vivos, variables de alto interés para evaluar el riesgo de incendios, sobre todo los índices de comportamiento dinámico y energético.

El presente estudio parte de la hipótesis de que es posible realizar una estimación del contenido de humedad del combustible vivo (LFMC) mediante percepción remota. El empleo de sensores satelitales, en particular, permite cubrir amplias extensiones de forma económica y simultánea. Si además ofrecen una alta resolución temporal, los datos obtenidos son aptos para apoyo a la toma de decisiones durante la campaña, además de para análisis para la planificación y prevención de incendios forestales.

Asimismo, se considera que la idoneidad de distintos sensores, productos y bandas de radiación para estimar la humedad del combustible vivo pueda ser diferente en función de la vegetación y las condiciones en la zona de interés concreta de la que se trate. La gran variedad de índices de reflectancia obtenibles a partir de diversas fuentes satelitales (como MODIS o Sentinel-2) ofrece la posibilidad de utilizarlos como predictores de la variable objetivo LFMC, ya sea individualmente o de forma combinada. La diferente resolución espacial, temporal, y espectral de los distintos sensores hace necesario explorar las posibilidades de todos ellos, así como sus ventajas y limitaciones. Otra de las dificultades en el establecimiento de correlaciones con datos de campo es la presencia de varias especies en el mismo píxel. Las especies forestales tienen diferente fisiología y respuesta a condiciones ambientales, con lo que el conjunto de humedades ofrece una respuesta espectral de difícil modelización. Es por ello que para poner a punto sistemas locales robustos basados en imágenes de satélite es frecuente trabajar con masas monoespecíficas. Los jarales son ecosistemas muy frecuentes y suelen generar alto peligro de incendios, siendo el comportamiento de su LFMC muy sensible a los cambios ambientales y por ello son comunidades con alto potencial de modelización (MARINO et al 2020) con fuertes aplicaciones prácticas como especies indicadoras del riesgo y peligro de incendios.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el contexto del proyecto “0753-CILIFO-5-E. POCTEP-INTERREG. Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra Incendios Forestales”, se ha venido realizando en Sierra Morena (Córdoba), un control del contenido de humedad del combustible vivo (LFMC) en jarales puros de *Cistus ladanifer*. Estos trabajos se encuadran dentro de la Acción 4.1 del proyecto CILIFO: “INVESTIGACIONES DIRIGIDAS A PROFUNDIZAR EL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO Y APLICABLE SOBRE EL ANÁLISIS Y LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES”, con el ánimo de establecer una metodología operacional para el seguimiento del LFMC con datos satelitales de alta resolución temporal, aplicable dentro del Plan de Prevención y Extinción de Incendios de Andalucía (INFOCA).

Finalmente, se buscaba poner a punto un protocolo para ubicar un alto número de localizaciones aptas para el muestreo y posteriormente para la toma de muestras, de manera que se optimizara el esfuerzo de muestreo frente a los resultados y se redujera el tiempo total, para obtener datos con el mayor grado de simultaneidad posible en los distintos emplazamientos.

2. Objetivos

Obtener una metodología de análisis multitemporal que permita estimar la evolución de la humedad del combustible vivo mediante percepción remota satelital. De esta manera se puede conocer el estado de disponibilidad o no de la vegetación, para el cálculo del riesgo de incendio de forma operativa, que es el fin último que se persigue. Los modelos obtenidos serán aplicables a masas de vegetación de características similares a las empleadas en el estudio. De esta manera, se obtienen recintos que actuarían como ventanas para conocer el estado de la vegetación a partir de la especie indicadora seleccionada. Se persigue además optimizar el flujo de trabajo para facilitar la aplicación operativa del método en el dispositivo INFOCA, dentro del marco de transferencia tecnológica y de conocimiento del proyecto CILIFO, con la Agencia de Medio Ambiente de Andalucía (AMAYA) como beneficiario directo de la transferencia de esta investigación.

3. Metodología

Datos de campo

Se planteó un diseño de parcelas permanentes en cuarenta masas monoespecíficas de *Cistus ladanifer* en Sierra Morena, en la provincia de Córdoba. Para ello se preseleccionaron los jarales con ayuda del mapa de vegetación de Andalucía 1/25.000 y otra cartografía de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), buscando optimizar el esfuerzo de recogida. Se consideró idónea la región de Sierra Morena en la mitad occidental de la provincia, desde la altura de Villafranca de Córdoba (al Este) hasta Las Navas de la Concepción (al Oeste) y desde la altura de Peñarroya-Pueblonuevo, al Norte, hasta el eje formado por Hornachuelos-Córdoba-Villafranca de Córdoba (**Figura 1**). La concentración de jarales permitió localizar emplazamientos fácilmente accesibles, para optimizar el esfuerzo de recogida y reducir el tiempo de desplazamiento de punto a punto, dentro de un esquema de muestreo oportunista, en el que, junto a la extensión, homogeneidad y densidad de las masas y el predominio de *Cistus ladanifer*, se primó también la accesibilidad. Se realizó un análisis de accesibilidad de jarales monoespecíficos de *Cistus ladanifer* en el que se seleccionaron emplazamientos potenciales. Se plantearon recorridos optimizados para reducir el tiempo de tránsito, empleando las vías de comunicación disponibles. Los recorridos se describieron en una guía de navegación para referencia de los equipos de campo (**Figura 1**). Posteriormente se localizaron en campo los puntos de muestreo definitivos en un área de aproximadamente 50 x 82 km. Se levantaron las localizaciones definitivas con GPS y se balizaron y fotografiaron los puntos de muestreo. Se procuró cubrir lo mejor posible una malla de referencia de 10 km de lado (**Figura 1**).

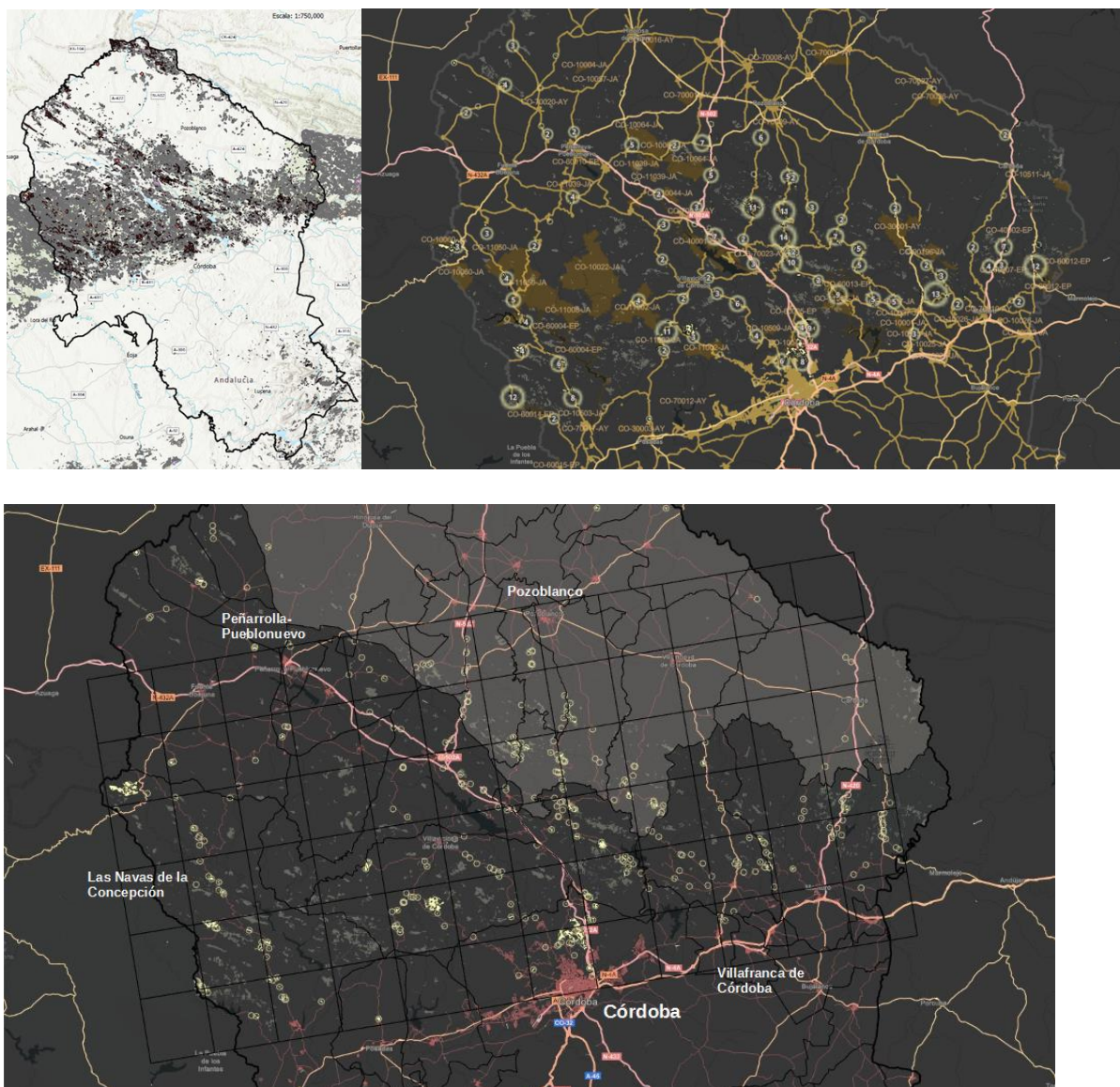


Figura1. Arriba, izquierda: Jarales con predominio de *Cistus ladanifer* en la provincia de Córdoba. Arriba, derecha: Jarales accesibles por carretera para optimizar la recogida de datos en representación clusterizada dinámica). Abajo: Una malla de 10 x 10 km ayuda a seleccionar las localizaciones candidatas a convertirse en puntos de muestreo.

Tanto para la visita de selección y primer muestreo como para las posteriores visitas y toma de muestras se emplearon *web maps* creados específicamente para cubrir las necesidades del equipo de campo. El mapa para la primera visita incluía una serie de recursos para ayudar a la selección de alternativas, mientras que el mapa de visita facilita especialmente la navegación de punto a punto, rodada y a pie. (Figura 2).

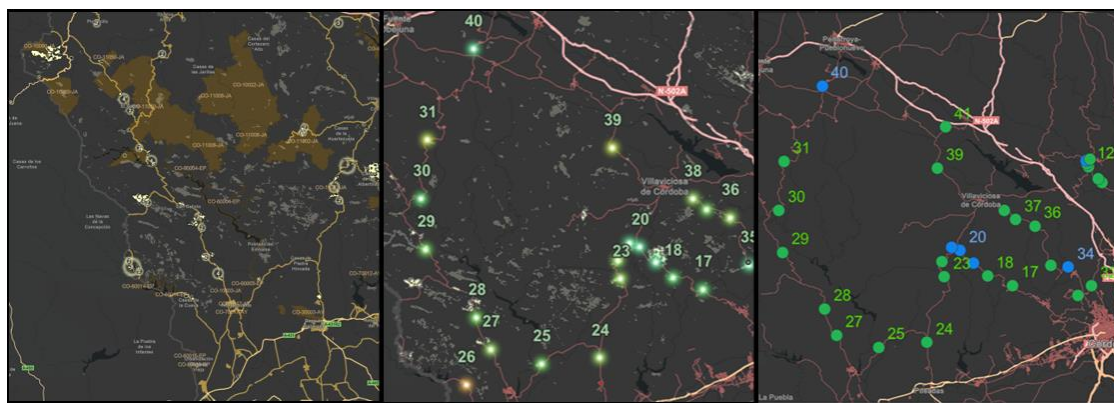


Figura2. Mapas web de jarales y emplazamientos. Izquierda: Detalle del mapa de planificación mostrando clústeres de recintos de jarales monoespecíficos procedentes del MVA 1:25.000 (en amarillo). Centro: mapa de evaluación de localizaciones en la primera visita. Derecha: web map simplificado para navegación, mostrando los puntos consolidados.

Se seleccionaron finalmente 39 puntos de muestreo. La periodicidad de recogida de muestra fue quincenal en verano y mensual en otoño. En este trabajo se presentan los datos correspondientes a verano y otoño de 2021 (6 meses). Para el muestreo destructivo de humedad se usó la metodología propuesta por el laboratorio de incendios del INIA-CSIC (MARINO et al. 2020) que se está usando actualmente por diversas comunidades autónomas. Para ello se cortan las partes terminales de, al menos, 5 ejemplares en cada punto de muestreo que se introducen en botes herméticos de tipo “duquesa” hasta llegar al laboratorio, donde se pesaron en fresco para posteriormente secar en estufa a 100°C y obtener el contenido de humedad referido a peso seco, esto es, LPMC=100% implica el mismo peso de agua que de materia seca.

Análisis espacial de los datos

Con el objeto de visibilizar tendencias espacio-temporales, los datos de campo de humedad se interpolaron mediante krigeado bayesiano empírico (EBK) para generalizar los resultados al conjunto de la zona de estudio y dar una idea de la evolución del contenido de agua de la vegetación a lo largo de la campaña. La interpolación proporciona una estimación válida para áreas de jarales con predominio de *Cistus ladanifer* en la zona de estudio. Este método aplica un *bootstrap* bayesiano al considerar distintos subconjuntos de puntos para los que la variable de interés es conocida, calcula el semivariograma parcial correspondiente, y obtiene un semivariograma final a partir de los semivariogramas parciales, con indicación de la bondad de ajuste para cada uno de los puntos originales (KRIVORUCHKO Y GRIBOV, 2019). Los mapas obtenidos por EBK se caracterizan por mostrar isolíneas curvas sin los dientes de sierra que pueden aparecer con otros métodos.

Procesado de datos de percepción remota

Se han empleado los sensores MSI embarcados en la plataforma Sentinel-2 (A y B) y MODIS, embarcado en Aqua y Terra. Sentinel-2 ofrece una resolución alta, de hasta 10 m, y un periodo de revisita de entre 2 a 5 días (ESA, 2015). MODIS ofrece revisitas diarias con una resolución de 500 y 1000 m (ROGER et al., 2015). Las imágenes de Sentinel-2 procesadas con Sen2Cor se obtuvieron de la página web de Copernicus (ESA) en formato SAFE (producto S2MSI2A). Para las imágenes de MODIS se recurrió a LAADS DAAC con preferencia a AppEEARS por la facilidad para automatizar las descargas y la conveniencia del formato HDF. Para MODIS se escogió procesar en primer lugar el producto MCD43A4, un compuesto de Terra y Aqua con las mejores lecturas para cada píxel en un periodo de dieciséis días (SCHAFF y STRAHLER).

Para encontrar el flujo de trabajo más eficiente se hicieron pruebas con distintas combinaciones de software comercial y abierto, incluyendo Erdas, Envi, ArcGIS Pro, SNAP y Matlab.

Finalmente se adoptó una combinación constituida por SNAP para el procesamiento de imágenes, ArcGIS Pro para la gestión de la información espacial y Matlab para proceso estadístico. Los mapas web se crearon sobre la plataforma ArcGIS Online.

Para la construcción de los modelos geoestadísticos se consideró una batería de índices integrada por EVI, GVMi, NDII, NDVI, NDI45 (no disponible para MODIS), NDWI, SAVI, VARI, Vigreen, NMDI, teniendo en cuenta la selección en estudios anteriores, especialmente el primer estudio que comparó la idoneidad de Sentinel-2 y MODIS para estimar la LFMC mediante modelos empíricos en masas de *Cistus ladanifer* (MARINO et al., 2020).

Modelización espacio-temporal

La predicción de la humedad se realizó mediante un modelo espacio-temporal de Krigeado Universal (KU). El KU integra en la estimación de la variable Z (humedad) la función de tendencia que depende de las variables auxiliares (los índices derivados de las imágenes satelitales) y la autocorrelación espacial y temporal de la variable Z modelizada mediante el variograma (MONTES Y LEDO 2010):

$$Z(s_0, t_0) = \sum_{k=0}^p \beta_k f_k(s_0, t_0) + \delta(s_0, t_0)$$

donde $Z_1(s_0, t_0)$ representa los valores de humedad en el punto s_0 y el día t_0 , $f_0(s_0, t_0) \dots f_k(s_0, t_0)$ es el valor de las variables auxiliares en el punto s_0 y el día t_0 , β_p son los coeficientes de las variables auxiliares (β_0 es el término independiente) y δ es el residuo ($\delta_1(s_0, t_0) \dots \delta_m(s_0, t_0)$) que presenta autocorrelación espacio-temporal caracterizada mediante los parámetros del variograma: efecto pepita (que representa la varianza no explicada por el modelo), meseta parcial (que representa la varianza explicada por la autocorrelación espacial y temporal) y alcance de autocorrelación espacial o temporal. Los parámetros de variograma y los coeficientes de la función de tendencia β_k ($k=0 \dots p-1$) fueron estimados usando el método de máxima verosimilitud (MARDIA Y MARSHAL 1984).

Finalmente se incorporaron al modelo las variables auxiliares derivadas de las imágenes satelitales cuyo coeficiente b presentaba p -valor < 0.05 .

Se realizó la validación cruzada, estimando el sesgo (valor medio de los residuos) y la precisión de la estimación de la varianza de la predicción (valor medio del cociente de los cuadrados de los residuos entre la varianza de la predicción)

Finalmente, se obtuvo una serie de mapas de predicciones de humedad de combustible para masas de matorral monoespecífico de *Cistus ladanifer*, aplicando los modelos a imágenes de Sentinel-2 y MODIS en la zona de estudio.

4. Resultados

Teniendo en cuenta únicamente los datos de campo, la humedad del combustible vivo (LFMC) obtenida a partir del trabajo de campo mostró un descenso generalizado en junio y julio, que se hizo abrupto en agosto, en la tercera visita. La quinta visita, en septiembre, mostró ya una recuperación del contenido de humedad. El krigeado de los datos de campo de la tercera visita, en agosto, llegó a mostrar amplias zonas de vegetación disponible, por debajo de un 80% de humedad, con una gran superficie en alta disponibilidad, con menos del 60% de humedad. Incidentalmente, tres días después de la visita, una ola de calor aumentó las temperaturas máximas en cerca de diez grados durante cuatro días en la zona de estudio. En 2021 se dio la circunstancia de que durante esa semana del 11 al 16 de agosto se produjeron dos incendios forestales en el área de estudio, uno de ellos, el más

grave en la provincia en los últimos 25 años, coincidiendo con la superficie que el krigeado de los datos de campo caracterizó como altamente disponible (próxima al 60% de humedad) (Figura 3).

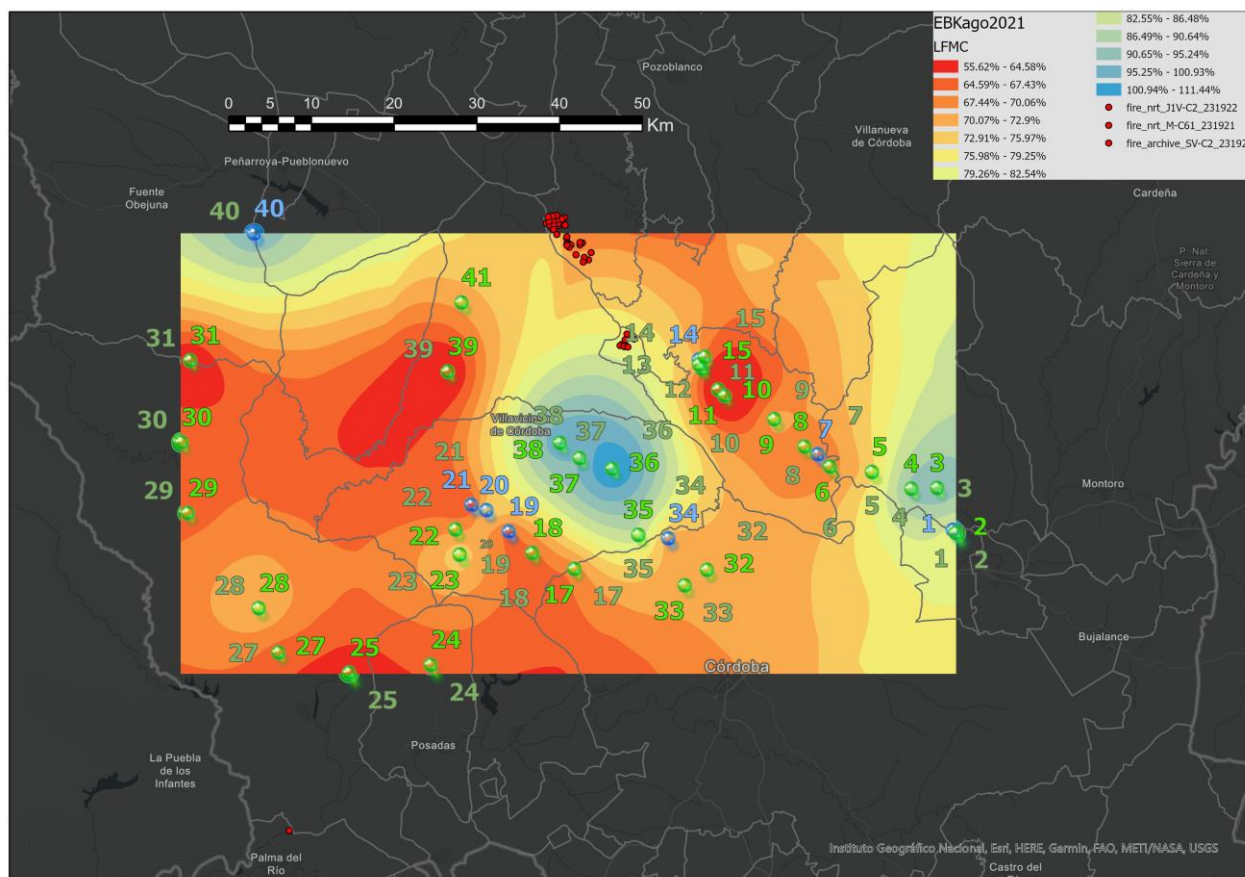


Figura 3. Mapa de humedad obtenido por EBK sobre datos de campo de agosto de 2021; la localización de los dos incendios producidos escasos días después del muestreo aparecen como puntos rojos, que indican anomalías térmicas detectadas por MODIS y VIIRS.

En cuanto a la estimación de la humedad del combustible fino vivo en jarales con predominio de *Cistus ladanifer*, objeto principal del presente estudio, los mejores modelos obtenidos usando los índices derivados de las imágenes procedentes de Sentinel-2 y MODIS seleccionaron como mejores predictores los índices GVMÍ y NDVI respectivamente con errores medios cuadráticos (RMSE) del 13,20% y 13,37%. (Figura 4). Los variogramas muestran que la correlación temporal es de 89 días y absorbe casi toda la varianza explicada, siendo el alcance de la correlación espacial entre 47 y 55 km.

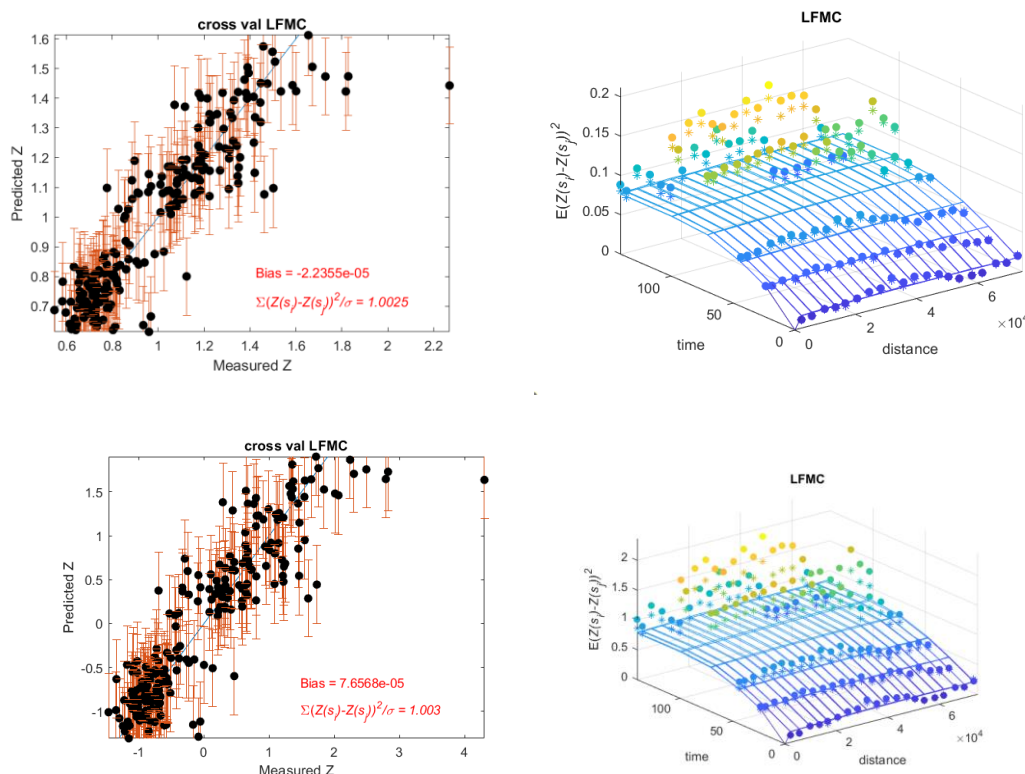


Figura 4. Validación cruzada entre LFMF según el modelo obtenido con Sentinel-2 (índice GVMI) y variograma espacio-temporal (arriba) y Validación cruzada entre LFMF según el modelo obtenido con MODIS (abajo)

Los modelos obtenidos a partir de datos Sentinel-2 sirvieron para generar mapas de predicción de LFMF para la zona de estudio (Figuras 5, 6, 7), siendo las predicciones del modelo MODIS muy similares. Los modelos permiten mostrar el potencial de los modelos dinámicos representando las diferencias espaciales de humedad para la misma fecha (Figuras 5, 7) y la secuencia de mapas de predicciones de junio a agosto de 2021 para seguir la evolución de la humedad, con la escala de color invertida. (Figura 6).

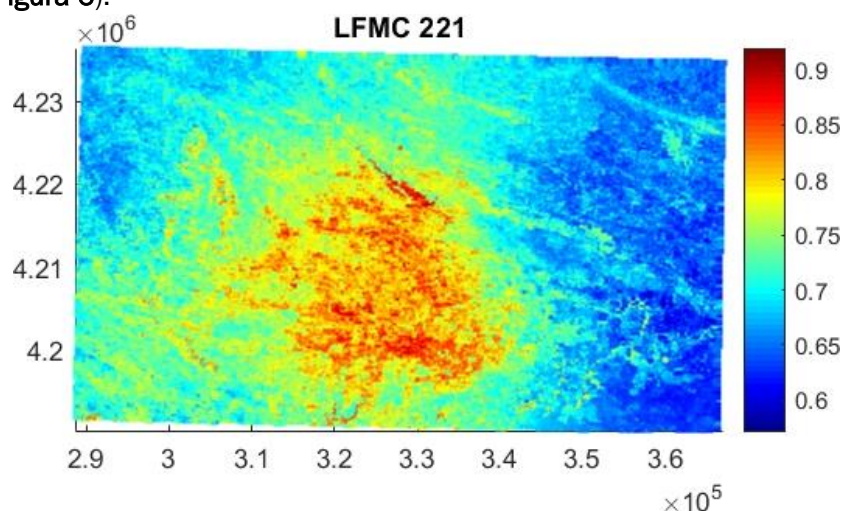


Figura 5. Mapa de predicciones de LFMF del 9 de agosto de 2021 (justo antes de la ola de calor 11-16 agosto) según el modelo ajustado con imágenes de Sentinel-2 (índice GVMI). Nótese que el rojo corresponde al máximo de humedad y el azul al mínimo.

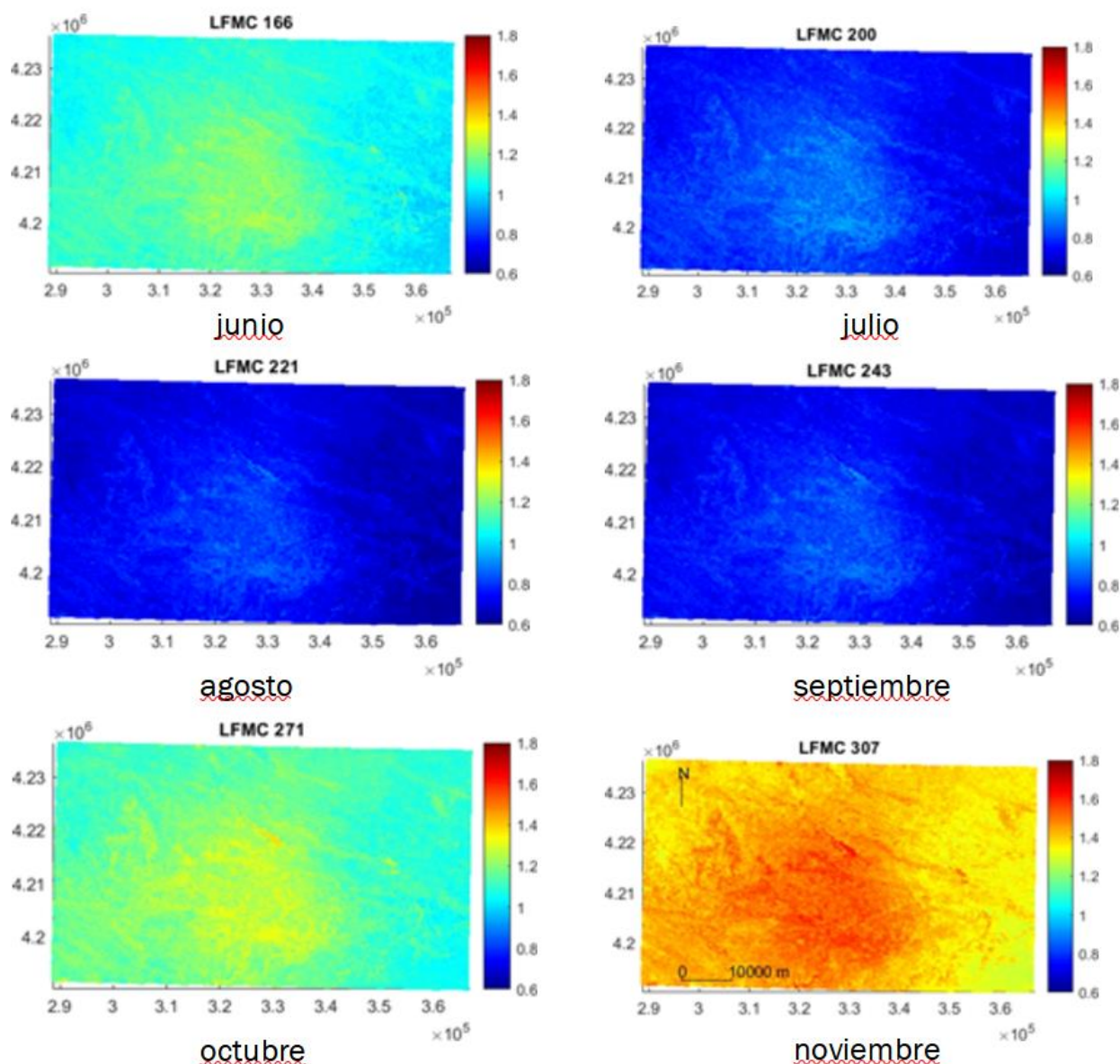


Figura 6. Secuencia mensual de predicciones de LFM usando el modelo obtenido procedente de imágenes de Sentinel-2 desde junio hasta noviembre de 2021. Nótese que el color rojo indica el máximo de humedad; el azul, el mínimo.

A continuación se muestra otro ejemplo de predicción, para el 3 de noviembre de 2021, esta vez restringido a jarales monoespecíficos sin arbolado, o con arbolado disperso (**Figura 7**). En este caso la escala de color muestra en azul las zonas que tendrían mayor contenido de humedad.

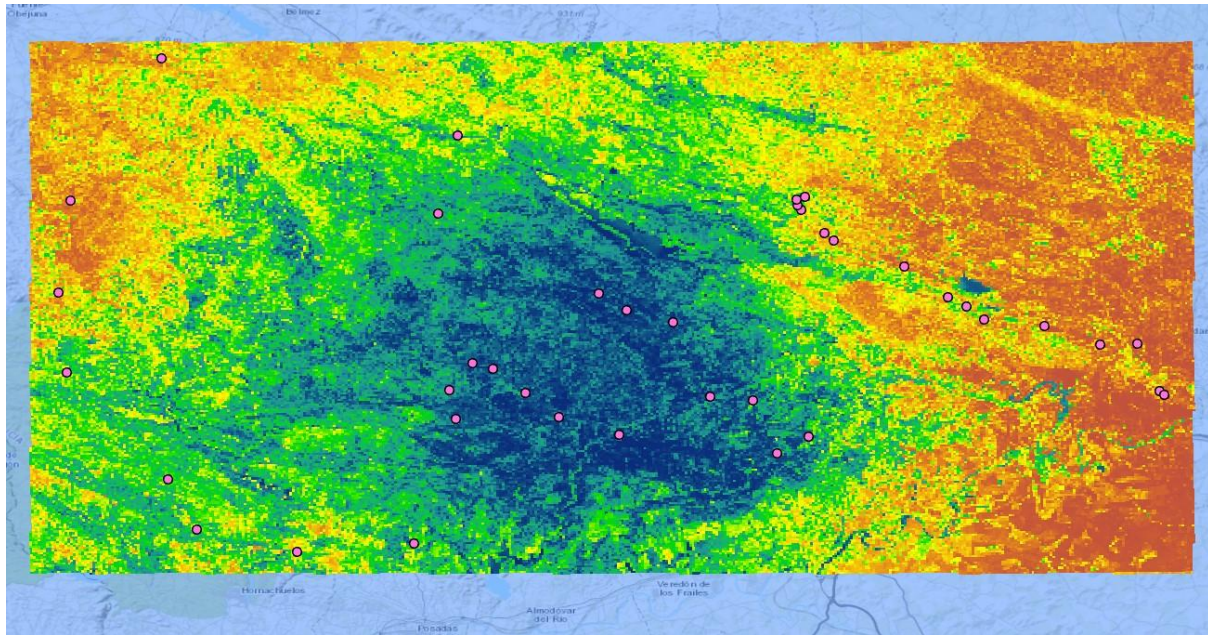


Figura 7. Predicción para la zona de estudio utilizando datos de Sentinel del 3 de noviembre de 2021. Se ha utilizado una escala de color más intuitiva, en la que el color azul indica el mayor contenido de humedad. El rojo, el mínimo.

Si restringimos las predicciones del modelo a las áreas de jaral monoespecífico de *Cistus ladanifer*, sin arbolado o sólo con arbolado disperso, se obtiene el resultado de la **Figura 8**. En este caso, para aplicar la máscara se han utilizado los datos del mapa de vegetación de la Junta de Andalucía de 2007.

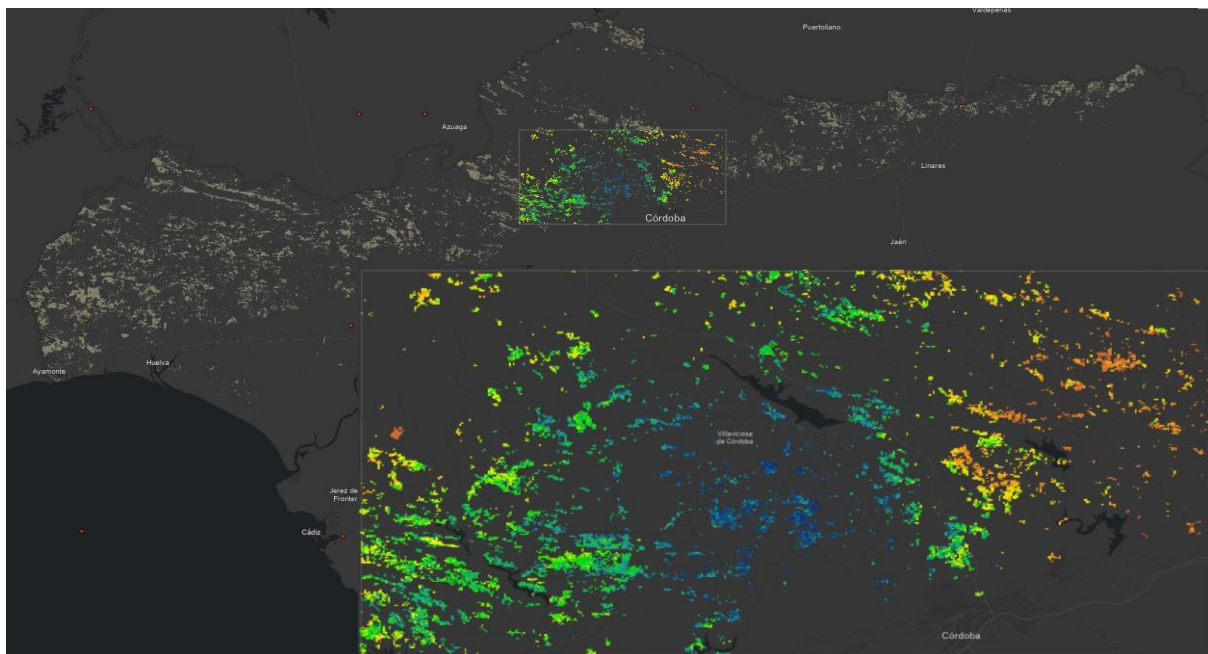


Figura 8. Arriba: Localización de la zona de estudio, mostrando la superficie de jaral monoespecífico sin arbolado o con arbolado disperso en el conjunto de Andalucía, según el Mapa de Vegetación de la Junta de Andalucía de 2007. Abajo: Ampliación de la zona de estudio con la estimación de humedad para jarales monoespecíficos de *Cistus ladanifer*, sin arbolado o sólo con arbolado disperso, utilizando datos de Sentinel-2 para el 3 de noviembre de 2021. El color azul indica el mayor contenido de humedad. El rojo, el mínimo.

La **Figura 8** muestra la estimación de humedad para localizaciones similares a aquellas en las que se ha basado el modelo, jarales monoespecíficos de *Cistus ladanifer* sin arbolado o con arbolado disperso, así como la ubicación y extensión de la zona de estudio en el conjunto de Andalucía.

5. Discusión

El krigeado bayesiano para los datos de la humedad de las muestras de campo aparece como un método válido para extender los resultados de campo de forma rápida, siempre y cuando se cuente con un número de localizaciones amplio (**Figura 3**). Es necesario tener en cuenta que el mapa obtenido sólo debería aplicarse a masas similares (en este caso, jarales monoespecíficos de *Cistus ladanifer*), tal como muestra la **Figura 8**. La abundancia de puntos situados a distintas distancias y el esfuerzo de muestreo sostenido en el tiempo ofrecen buenas posibilidades para el krigeado, especialmente con el empleo de variables auxiliares como la incidencia solar potencial para todo el territorio, en función del relieve, la latitud y el momento del año (GUERRERO, 2008) y de variables meteorológicas como la precipitación acumulada. Por tanto son variables auxiliares que podrían mejorar los resultados presentados.

En cuanto a la estimación de la humedad del combustible vivo mediante datos satelitales, los modelos de krigeado universal espacio-temporal obtenidos en el presente estudio indican que la humedad de cada masa correlaciona mejor con sus estados anteriores y posteriores (hasta unos 68 días) que con las masas vecinas (**Figura 4**). Se mantiene una correlación espacial hasta los 47-55 km, para un área de estudio de 50 x 82 km. Cabe señalar que la zona de interés presenta un relieve acentuado y se producen fenómenos de microclima debido a la orientación y exposición al sol, diferente precipitación, diferente escorrentía por exceso dunneano y hortoniano, etcétera, que han absorbido poca variabilidad en el modelo (**Figura 4**).

Los datos de reflectancias de Sentinel-2 y MODIS (producto compuesto MCD43A4) han proporcionado información útil para la estimación de LFMC en jarales de *Cistus ladanifer* en Sierra Morena (**Figuras 5-8**). Los modelos obtenidos han mostrado un buen ajuste, con RMSE muy similares. En el caso de Sentinel-2, la mejor correlación la ofreció el índice GVMI, sensible al agua, mientras que para MODIS ha sido el NDVI, sensible a la clorofila, dando las predicciones de mayor ajuste y menor error. MARINO et al. (2020), para una zona de estudio en la región de Madrid, también con masas de *Cistus ladanifer*, obtuvieron los mejores resultados para los índices SAVI y NDVI en ambos casos (ambos sensibles a la clorofila), con un mejor ajuste de MODIS.

Dado que las variaciones de humedad pueden llegar a afectar a la actividad de la clorofila, los índices sensibles a la misma pueden proporcionar una estimación indirecta del contenido de humedad (YEBRA et al. 2023, COSTA-SAURA et al. 2021, MARINO et al., 2020). Por otra parte, un índice sensible al agua como el GVMI podría proporcionar una respuesta más rápida frente a cambios bruscos en el contenido de humedad de la vegetación y sería potencialmente más útil. Sin embargo, MARINO et al. (2020) obtuvieron bajas correlaciones con índices sensibles al agua como NDWI y NDII6. No obstante, posteriormente se han publicado buenos resultados para una zona de estudio en la región central de Valencia con otro índice sensible al agua como es el NDMI, al combinar datos de Sentinel-2 con variables meteorológicas (COSTA-SAURA et al., 2021).

En el presente estudio, cabría considerar que, al observar jarales que, en gran medida, presentaban un porte similar, asimilables al modelo de combustible 6 de Rothermel con similar biomasa seca entre localizaciones, se podría asumir que el contenido de humedad del píxel y de la vegetación (LFMC) sean proporcionales, obteniéndose buena correlación con el GVMI. Este efecto podría explicar en parte por qué con la disminución de resolución espacial de MODIS se hayan obtenido mejores correlaciones con NDVI que con GVMI. Las correlaciones con GVMI podrían

mejorarse conociendo el contenido de biomasa en el píxel y calculando el contenido total de agua o espesor total de agua (EWT), mejor que correlacionando con la fracción de humedad de la vegetación (CECATTO et al, 2002; YEBRA et al., 2013). Dentro del marco del proyecto CILIFO se tiene previsto realizar un nuevo mapa de modelos de combustible que podría ayudar a estimar la biomasa y mejorar las correlaciones con GVMI y posiblemente otros índices sensibles al contenido de agua, como NDWI o NDII. Por otra parte, el empleo de índices sensibles al contenido de materia seca (DMC), como el NDMI, podría mejorar las estimaciones de LFMC (YEBRA et al., 2013). En particular, dado que la LFMC es la ratio entre EWT/DMC, WANG et al. (2013) propusieron emplear la ratio entre un índice sensible al agua y un índice sensible a la materia seca, obteniendo resultados significativos, especialmente con NDII6 y NDMI, si bien no lineales. El modelo teórico que emplearon explicaba bien el comportamiento a nivel de hoja, pero sería necesaria más investigación para extenderlo a nivel de cubierta vegetal.

En líneas generales, los mapas generados a partir de los modelos para las fechas de muestreo (**Figura 6**) siguen las tendencias apuntadas en los mapas procedentes de krigeado de los datos de campo (**Figura 3**). Un estudio subsiguiente podría señalar el grado de ajuste alcanzado en recintos identificados como masas mono-específicas de *Cistus ladanifer*. El carácter de muestreo oportunista del trabajo de campo aceptaba la cercanía a cobertura artificial en algunas localizaciones (asfalto en carretera y pistas asfaltadas y suelo desnudo compactado o zahorra en pistas no pavimentadas). A pesar de este factor, se han obtenido buenos resultados de ajuste. El efecto de las carreteras y pistas resulta asumible, por tanto, teniendo en cuenta las ventajas de muestrear a pie de pista.

6. Conclusiones

La metodología propuesta demuestra ser útil para generar modelos que estimen el contenido de humedad de combustible vivo y su disponibilidad a partir de datos satelitales, con el objetivo de calcular el riesgo durante una campaña de incendios. De esta manera, el modelo podría aplicarse en Sierra Morena sobre recintos identificados como jarales con *Cistus ladanifer*. Estos recintos actuarían como ventanas al territorio en las que tendríamos información sobre la disponibilidad de la vegetación, teniendo en cuenta la humedad de *Cistus ladanifer* como especie indicadora. Otras posibilidades para ampliar la cobertura en el territorio incluirían especies indicadoras como el romero (*Salvia rosmarinus/Rosmarinus officinalis*) o el enebro (*Juniperus communis*).

Los trabajos futuros para llegar a nivel operativo pasarían por generar modelos dinámicos de combustible incluyendo la humedad y la inflamabilidad en jarales para mejorar los índices de riesgo en Sierra Morena, metodología que puede extenderse a otros ecosistemas.

La utilización de datos climáticos como variables auxiliares, como por ejemplo la precipitación acumulada o el déficit de presión de vapor (RESCO DE DIOS, et al. 2021), podrían contribuir a mejorar el desempeño de los índices sensibles al agua (como el NDMI) y el krigeado.

Tanto MSI como MODIS han dado buenos resultados y resultan aptos para operar. Los datos de alta resolución de MSI posiblemente ofrezcan un mayor potencial de mejora, aunque también requieren un hardware mucho más potente para procesarlos, especialmente cuando se trata de grandes extensiones, como la del área de interés del presente estudio.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto 0753-CILIFO-5-E. POCTEP-INTERREG. Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra Incendios Forestales la oportunidad que ha brindado para realizar el presente estudio. También, a la Agencia de Medio Ambiente de Andalucía (AMAYA) y a la Dirección General de Medio Natural, Biodiversidad y Espacios Protegidos en la Consejería de Agricultura,

Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (CAGPDS) de la Junta Andalucía, su colaboración y apoyo para acceder a fincas y montes y facilitar el muestreo.

8. Bibliografía

CECATTO, P; FLASSE, S; GRÉGOIRE, J-M. 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications. *Remote Sens.* 82 (2002), 198-207.

COSTA-SAURA, J.M.; BALAGUER-BESER, Á; RUIZ, L.A; PARDO-PASCUAL, J.E; SORIANO-SANCHO, J.L. 2021. Empirical Models for Spatio-Temporal Live Fuel Moisture Content Estimation in Mixed Mediterranean Vegetation Areas Using Sentinel-2 Indices and Meteorological Data. *Remote Sens.* 13 (2021), 3726 – 3752.

EUROPEAN SPACE AGENCY; 2015. SENTINEL-2 User Handbook. ESA Standard Document. Issue 1 Rev 2.

GUERRERO, J.J. 2008. Modelo Digital de Incidencia Solar. Rediam. Junta de Andalucía. <http://www.ideandalucia.es/catalogo/inspire/srv/api/records/5b72056c-6b37-4689-80f6-e8edbb434aac> (acceso 14/08/2021).

KRIVORUCHKO K. y GRIBOV A.; 2019. Evaluation of empirical Bayesian kriging, *Spatial Statistics* Volume 32 (2019) 100368- 100395.

MARDIA, K.V.; MARSHALL, R.J. 1984. Maximum Likelihood Estimation of Models for Residual Covariance in Spatial Regression. *Biometrika*. Vol 71, No. 1 (Apr., 1984), pp. 135-146.

MARINO, E.; YEBRA, M.; GUILLÉN-CLIMENT, M; ALGEET, N; TOMÉ, J. L.; MADRIGAL, J; GUIJARRO, M; HERNANDO, C, 2020. Investigating Live Fuel Moisture Content Estimation in Fire-Prone Shrubland from Remote Sensing Using Empirical Modelling and RTM Simulations. *Remote Sens.* 12 (2020), 2251 – 2270.

MONTES, F; LEDO, A. 2010. Incorporating environmental and geographical information in forest data analysis: A new fitting approach for universal kriging. *Can. J. For. Res.* 40(9):1852-1861.

RESCO DE DIOS, V; CUNILL-CAMPRUBÍ, A. ; PÉREZ-ZANÓN, N. ; PEÑA, J. ; MARTINEZ DEL CASTILLO, E.; RODRIGUES, MARCOS ; YINAN, Y; YEBRA, M; VEGA-GARCIA, C; BOER, M. (2021). Convergence in critical fuel moisture and fire weather thresholds associated with fire activity in the pyroregions of Mediterranean Europe. *Sci. Total Environ.* 806. 151462-151474.

ROGER, J.C; VERMOTE, E.F; RAY, J.P; 2015. MODIS Surface Reflectance User's Guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility.

SCHAAF, C; STRAHLER, ALAN. MODIS MCD43 Product User Guide V005. University of Massachusetts.

YEBRA, M; DENNISON, P. E; CHUVIECO, E; RIAÑO, D; ZYLSTRA, P; RAYMUND HUNT E.; DANSON, F. M; QI, Y; JURDAO, S. 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sens.* 136 (2013) 455-468.