



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
julio · 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

Estudio de la evolución de la humedad del combustible fino vivo en un ámbito forestal mediterráneo insular (Illes Balears)

DOMENECH AGENJO, O.¹, CARDONA AMETLLER, C.², RIBAS COSTA, V.³, DE SIMÓN BAÑÓN, E.¹

¹ Servicio de Gestión Forestal y Protección del Suelo, Govern de les Illes Balears.

² Centre Forestal de les Illes Balears, CEFOR Menut (IBANAT - Govern de les Illes Balears).

³ Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural.

⁴ Servicio de Gestión Forestal y Protección del Suelo, Govern de les Illes Balears.

Resumen

La humedad del combustible vivo (LFMC), como factor determinante de la disponibilidad del combustible para arder, juntamente con los factores meteorológico y topográfico, tiene una enorme importancia a efectos de estimar el riesgo de incendio forestal, así como su comportamiento. En el presente trabajo se describe el valor y la evolución de la humedad del combustible fino vivo a partir del muestreo de campo y secado en laboratorio, de diferentes especies forestales representativas de un ámbito insular mediterráneo, como es el caso de la isla de Mallorca (Illes Balears), así como conocer su evolución temporal, especialmente durante la época de mayor riesgo de incendio. También se ha investigado si existe una relación empírica entre la LFMC y el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI), colectado a través del sensor de Sentinel-2 (Copernicus) a lo largo de 12 meses. Se han observado valores de humedad similares a otros estudios parecidos, con una elevada amplitud de rango en arbustos germinadores obligados (*Cistus albidus*, *C. monspeliensis*, *Erica multiflora*, *Rosmarinus officinalis*), mientras que los arbustos rebrotadores o los árboles, han mostrado rangos de humedad menores y con una respuesta menos rápida a condiciones de mayor o menor estrés hídrico. Destaca la poca variabilidad a lo largo del estudio de especies como *Pinus halepensis* o *Pistacia lentiscus*. La obtención de la evolución de la humedad del combustible en tiempo real o a partir de variables explicativas (índices satelitales o de sequía) permite monitorizar eficazmente las ventanas de comportamiento del fuego o riesgo de ignición más desfavorable, especialmente desde el ámbito operativo, tanto para modular las capacidades reactivas del dispositivo de extinción como para trabajar eficazmente en prevención (e.g. quemas prescritas).

Palabras clave

Incendios, teledetección, combustible, sequía, insularidad.

1. Introducción y objetivos

Dentro de los factores principales que determinan el comportamiento y la propagación de los incendios forestales está el combustible vegetal, juntamente con las variables meteorológicas y el entorno topográfico (PYNE et al., 1984). Sin embargo, es del combustible del que depende la ignición, propagación e intensidad que conjuntamente determinan el comportamiento del fuego (BROWN & DAVIS, 1973). Por lo tanto, el contenido de humedad del combustible es uno de los principales factores que condicionan el comportamiento del fuego (ROTHERMEL, 1983; SULLIVAN, 2009; ALEXANDER & CRUZ, 2013), ya que determina como se produce parte de su proceso de combustión. Precisamente, la humedad del combustible es especialmente importante en la transición entre el precalentamiento del combustible y su combustión en llama (RESCO, 2020).

El combustible se puede diferenciar entre muerto y vivo, a razón de sus propias características ecofisiológicas, pero también para distinguir dos mecanismos completamente diferentes que determinan tanto su humedad como su dinámica (KEANE, 2015) y por lo tanto, del comportamiento del fuego durante un incendio forestal.

A diferencia de la humedad del combustible muerto (VINEY, 1991; AGUADO et al., 2007; MATHEWS, 2014) que se puede aproximar con más precisión a partir de ciertas variables atmosféricas, la del combustible vivo presenta mucha más complejidad para su modelización, por su dinámica ecofisiológica y sus rasgos estructurales: potencial hídrico, transpiración, almacenamiento de agua, composición química, densidad, fenología, estructura del dosel, espesor de la corteza, etc. (JOLLY & JOHNSON, 2018; NOLAN et al., 2018; NOLAN et al., 2020).

La humedad del combustible puede ser especialmente determinante en la propagación de un fuego forestal, con una respuesta esperada de tipo umbral (CHUVIECO et al., 2009; DENISON & MORTIZ, 2009; NOLAN et al., 2016), también a partir de sus indicadores alternativos como el déficit de presión de vapor para el muerto o índices satelitales para el vivo (RESCO et al., 2021). Por lo tanto, el conocimiento de sus valores en las distintas tipologías que integran el combustible vivo, especialmente del fino (< 6 mm de diámetro), y para algunas de las especies sobre las que se generan grandes incendios forestales, puede ser especialmente útil.

La cuenca mediterránea, tiene un clima caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos suaves y húmedos, combinación que favorece su propensión a la ocurrencia de incendios forestales recurrentes durante la estación seca. En esta estación, el combustible está más disponible para arder, en base al crecimiento y acumulación de biomasa vegetal durante la estación húmeda donde la precipitación excede el potencial de evapotranspiración (RUNDEL, 2010). Normalmente, estos incendios acostumbra a presentar una frecuencia intermedia, pero intensidades de combustión elevadas (PAUSAS, 2012), por las condiciones meteorológicas favorables del verano (elevada temperatura, baja humedad relativa) y de la mayor disponibilidad del combustible vegetal.

El cambio climático puede incrementar la frecuencia, intensidad y severidad de los incendios forestales en la cuenca mediterránea, tal y como pasa en otras partes del mundo (RUFFAULT et al. 2018), proyectándose cambios en la humedad del combustible que podrían resultar en un alargamiento de la temporada de incendios para ciertas áreas (LOZANO et al., 2017). O sea que los cambios en los regímenes de incendios impulsados por el clima funcionan principalmente mediante la alteración de los patrones espaciales en la estructura del combustible y los patrones temporales de la humedad del combustible (PAUSAS & KEELEY, 2014).

Actualmente, las masas forestales de la isla de Mallorca, al igual que en otras zonas análogas de la cuenca mediterránea, presentan una problemática recurrente ligada a las perturbaciones causadas por los grandes incendios forestales. La isla integra una superficie forestal de 150.249 ha, que supone un 41% de su territorio, siendo el 77% monte arbolado, ya sea denso o ralo (MAGRAMA, 2012). En el territorio de las Illes Balears, cada año arden una media de 117 ha (máx. 2.845 ha/año) a partir de una media de 116 siniestros (máx. 172/año) por año (PERIODO DE CONSULTA 2000-2019 DEL EGIF GOBIERNO DE LES ILLES BALEARS/MINISTERIO DE TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO), con ocurrencia de eventos de grandes incendios forestales fuera de capacidad de extinción cada cierto intervalo de tiempo, siendo el 1% de estos responsables del 76% de la superficie quemada (DOMENECH, 2015).

Existen diversos trabajos en base a la importancia de la humedad del combustible vivo sobre el comportamiento del fuego en entornos forestales de la cuenca mediterránea. Por un lado, se ha estimado la humedad del combustible vivo en base a métodos empíricos de campo en distintas

zonas mediterráneas (CASTRO et al., 2007; SORIANO Y QUILEZ, 2017; MARTIN-STPAUL et al., 2018, COSTA-SAURA et al., 2021). En otros casos relacionando la humedad del combustible con variables meteorológicas como índices de sequía (e.g. Drought Code) o variaciones meteorológicas estacionales (VIEGAS et al., 2001; PELLIZARO et al. 2007), y en otros solamente mediante simulaciones de laboratorio (ROSSA et al., 2018). Por otro lado, también se ha investigado la humedad del combustible vivo a partir de estimaciones usando sensores satelitales de cara a establecer correlaciones a partir de métodos de laboratorio (YEBRA et al., 2013, LEI FAN et al., 2018).

La importancia de conocer el valor de la humedad del combustible como variable complementaria para evaluar el riesgo de incendio forestal, puede ser especialmente importante de cara a identificar rápidamente umbrales de humedad del combustible que puedan favorecer situaciones críticas de inflamabilidad, y por lo tanto de riesgo extremo (e.g. alrededor del 70-100 % en el combustible vivo, o del 14 % en el muerto, en RESCO (2020).

A razón del alto coste del trabajo de muestreo de combustible vivo para determinar su humedad a lo largo del tiempo y en múltiples localizaciones, el análisis satelital puede ser una herramienta fundamental para su monitorización (MARINO et al. 2020). Actualmente se dispone de datos de sensores espectrales, fácilmente accesibles, procedentes de distintas plataformas satelitales. Los sensores ópticos de MODIS (NASA) y Sentinel (Copernicus) arrojan datos a distintas resoluciones espaciales y temporales, y a partir de diferentes resoluciones espectrales. En base a la mayor o menor reflectancia de la vegetación a través de las diferentes bandas espectrales (como la infrarroja o el visible), medidas por el sensor satelital, se determinan distintos índices (e.g. NVDI) que reflejan su mayor o menor vigor fotosintético y, por lo tanto, de contenido de agua. En base a estos datos satelitales, se puede estimar empíricamente la humedad del combustible vivo en un determinado ámbito espacial y temporal, y en todos los casos a partir de su correspondiente calibración y validación.

Como objetivo principal del presente trabajo, se pretende determinar el valor y la evolución de la humedad del combustible vivo a partir del muestreo en campo de diferentes especies forestales representativas de un ámbito insular mediterráneo, como es el caso de la isla de Mallorca (Illes Balears), ya que no existen trabajos concretos previos de estimación de la humedad del combustible vivo en un entorno insular. Así como conocer su evolución temporal a lo largo del año, especialmente durante la época de mayor riesgo de incendio. Complementariamente, se pretende estimar si se da una relación empírica entre el valor muestreado de la humedad del combustible, o sea de la disponibilidad de éste para arder, con los datos de los sensores satelitales disponibles, de cara a poder monitorizar eficazmente las ventanas de comportamiento del fuego o riesgo de ignición más desfavorable, especialmente desde el ámbito operativo.

2. Metodología

2.1. Área y parcelas de muestreo

Las parcelas de muestreo se localizan en la isla de Mallorca (Illes Balears) (39°37'0"N 2°57'0"E), archipiélago ubicado en la zona occidental de la cuenca mediterránea (Figura 1).

A nivel meteorológico, el área de muestreo se corresponde con un clima termomediterráneo, con una pluviometría anual alrededor de los 450 mm, con una marcada estación seca durante el verano y con un máximo de precipitaciones durante el otoño y en menor medida primavera, aunque con fuerte irregularidad. La temperatura media anual está alrededor de los 17 °C, con incrementos en los meses de verano hasta los 25 °C.

Fitoclimáticamente, se distribuyen dentro del piso termomediterráneo, entre seco y subhúmedo. A nivel de vegetación, las zonas de muestreo aparecen como bosques, maquias o matorrales perennifolios esclerófilos (*Pistacio lentisci-Rhamnetalia alaterni*) (LLORENS et al., 2007), con distintos grados de cobertura vegetal, tanto arbolada como arbustiva (en todos los casos >20% de cobertura). En el conjunto de parcelas, además de las especies incluidas en el estudio, también aparecen con frecuencia arbustivas fanerófitas como *Rhamnus alaternus*, *Phyllirea latifolia*, *Chamaerops humilis*, *Calicotome spinosa* o *Arbutus unedo*; geófitos como *Asphodelus ramosus* o *Drimia marítima*; o herbáceas como *Brachypodium retusum*, entre otras. En numerosos casos, las parcelas de muestreo se ubican en áreas forestales procedentes de antiguos cultivos abandonados en un escenario pasado de transición forestal.

Las parcelas de muestreo tienen un diámetro máximo de 20 m. Estas dimensiones varían en función de la distribución más o menos compacta de las distintas especies representadas, siempre buscando formas circulares o semicirculares y minimizando la distancia al centro de la parcela.

Tabla 1. Parcelas de muestreo, distribución y características físicas principales.

Parc.	Municipio	Lugar	Coordenadas centro parcela (ETRS 89 31N)	UTM	Pendiente (°)	Orientación	Altitud (m)	Distancia mar (km)
2	Puigpunyent	Puigpunyent	463605	4386188	15	S	250	9
3	Santa Maria del Camí	S'Estremera	477245	4391809	20	SE	200	12
5	Selva	Comuna de Caimari	491170	4403925	35	S	330	20
6	Artà	Sa Duaia	533219	4397204	25	SO	200	4
7	Santa Margalida	Son Real	516003	4398877	< 5	Llano	40	1
8	Felanitx	Felanitx	520167	4365943	< 5	Llano	100	4
9	Lloret	Comuna de Lloret	496587	4385585	< 5	Llano	150	22
10	Llucmajor	Llucmajor	488902	4366630	< 5	Llano	110	10

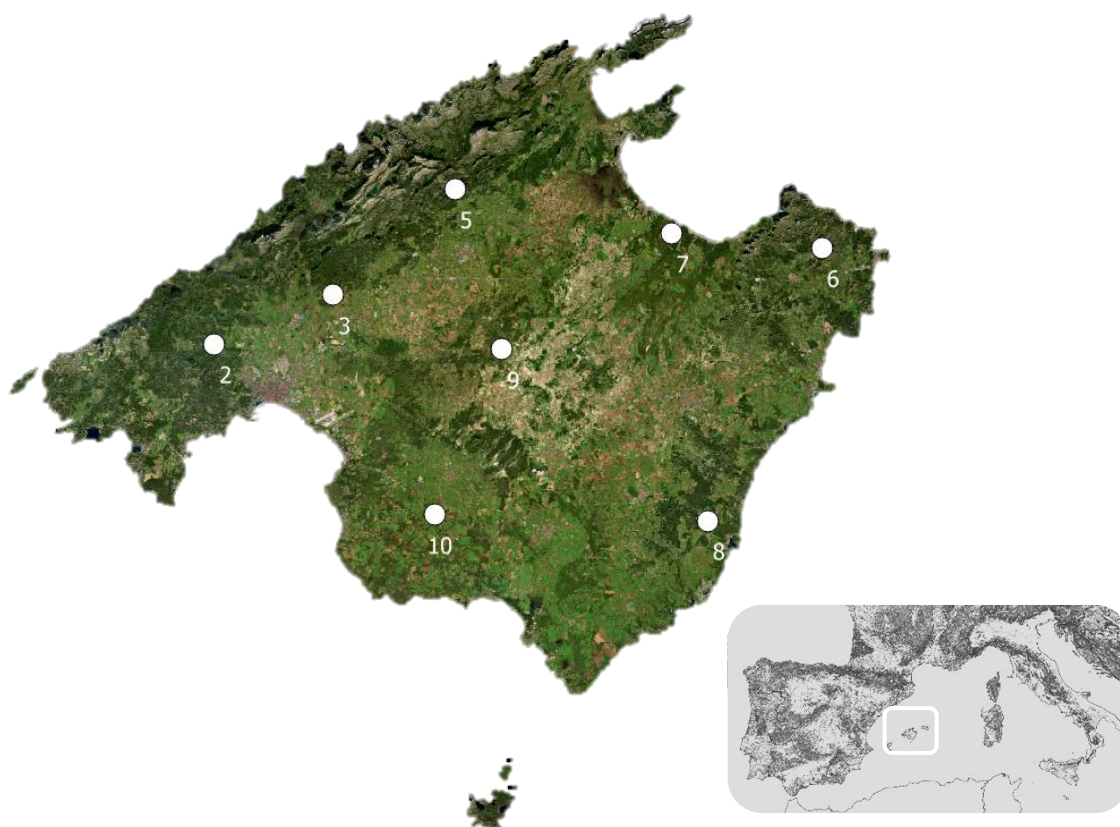


Figura 1. Distribución de las parcelas de muestreo (Parc.) en la isla de Mallorca.

Las 8 parcelas (Tabla 1) se han escogido en función de los siguientes criterios generales:

- Representatividad respecto al territorio forestal, de posibles escenarios de incendio forestal, así como de las distintas realidades climáticas y biológicas insulares.
- Representatividad en cuanto a la estructura del combustible más común de las diferentes especies consideradas, tanto a nivel de individual como de formación.
- Ausencia de condiciones extremas en cuanto a la topografía (preferentemente vertientes no excesivamente pronunciadas o zonas llanas), climatología (evitando microclimas o condiciones zonales poco comunes), edafología, características silvícolas, etc.
- Orientaciones dentro de los dos cuadrantes S o zonas llanas.
- Rapidez y facilidad de acceso con vehículo, por razones de eficacia operativa.
- Presencia de un número mínimo de especies a estimar en cada zona de muestreo.
- Homogeneidad del tipo de vegetación dentro de la parcela, evitando el efecto borde hacia otro tipo de coberturas vegetales.
- Zonas de muestreo cercanas a estaciones meteorológicas oficiales (<10 km) para permitir un posible estudio de correlación posterior.

2.2. Especies monitorizadas

Se han elegido 9 especies vegetales arbóreas o arbustivas típicas de los ambientes forestales insulares, sean arbolados o desarbolados (Tabla 2). Algunas especies (*Pinus halepensis*, *Olea europaea*, *Pistacia lentiscus* y *Erica multiflora*) se han muestreado con más intensidad que otras (*Cistus albidus*, *Cistus monspeliensis*, *Rosmarinus officinalis* y *Ampelodesmos mauritanicus*), a razón de su mayor frecuencia de distribución en la isla y, sobre

todo, de su mayor papel dentro del comportamiento del fuego en escenarios de incendio posibles.

Asimismo, el número de especies se ha limitado a aquellas que puedan ser repetidas en las distintas parcelas de muestreo y de cara a muestrear únicamente aquellas especies que tengan una mínima representatividad a nivel de fracción de cabida cubierta, especialmente de cara al posterior análisis satelital. Asimismo, en este conjunto de especies seleccionadas se incluyen diferentes estrategias reproductivas, ya sean rebotadoras o germinadoras.

Por cada parcela ha habido diferencias en el número de réplicas muestreadas durante el periodo de estudio, en función de las capacidades disponibles en todo momento y de la situación favorable a su extracción (meteorología, muestras secas, etc.). Las réplicas se han muestreado buscando la máxima representatividad de los individuos escogidos.

De la mayor parte de especies muestreadas, existen estudios publicados de sus datos de humedad en distintas zonas del ámbito mediterráneo, de modo que se puede hacer una comparación al respecto.

Tabla 2. Especies monitorizadas por parcela y estrategia reproductora habitual.

Especie	Parcela								Estrategia reproductiva
	2	3	5	6	7	8	9	10	
<i>Pinus halepensis</i> (Ph)	x	x	x	x	x	x		x	Germinadora obligada
<i>Cistus albidus</i> (Ca)								x	
<i>Cistus monspeliensis</i> (Cm)					x		x	x	
<i>Rosmarinus officinalis</i> (Ro)					x				
<i>Olea europaea</i> (Oe)	x	x	x	x	x	x	x	x	Rebrotadora / Germinadora
<i>Quercus ilex</i> (Qi)				x					
<i>Erica multiflora</i> (Em)	x	x	x	x	x	x			
<i>Pistacia lentiscus</i> (Pl)	x	x	x	x	x	x	x	x	
<i>Ampelodesmos mauritanicus</i> (Am)	x		x	x					

2.3. Periodo e intervalos de muestreo

El periodo de muestreo realizado, así como sus distintos intervalos por parcela quedan expuestos en la Tabla 3.

Tabla 3. Periodos y tiempos de muestreo.

Inicio de la toma de muestras	15 de julio de 2020
Final de la toma de muestras	16 de junio de 2021
Criterio de periodicidad	Quincenal
	Julio – Octubre (4 meses)
	Mensual
	Noviembre – Junio (8 meses)

2.4. Metodología de muestreo

La metodología de muestreo y de análisis de laboratorio ha sido análoga a la de otros trabajos similares de análisis de la humedad del combustible vivo (COUNTRYMAN & BRADSHAW, 1980; VIEGAS et al., 2001; Recomendaciones del Laboratorio del Fuego del INIA).

Se han recogido tres réplicas de tres individuos (20-40 g) de partes vivas finas con diámetro inferior a 6 mm sin flores ni frutos. Estas muestras se han guardado en botes de plástico herméticos hasta la llegada a laboratorio. La hora aproximada de recogida ha sido entre las 11:00 y las 14:00 h. En el caso del pino carrasco (*Pinus halepensis*), se ha considerado combustible fino muerto el conjunto de acículas muertas suspendidas que aparecen a lo largo del verano de forma imbricada con las partes vivas, y, por lo tanto, se ha retirado ya que no forman parte del vivo. Sin embargo, la presencia de estas hojas muertas suspendidas en las copas de los pinos, pueden tener un efecto importante a nivel de su inflamabilidad (y de la humedad del combustible de la planta en su globalidad), hecho que debe tenerse en cuenta, de cara a su necesaria monitorización a nivel operativo (BALAGUER-ROMANO et al., 2020)

2.4.1. Metodología de análisis en laboratorio

El contenido de humedad del combustible vegetal (HCV, o *Live Fuel Moisture Content*), expresado en porcentaje de peso seco, se define por la siguiente expresión:

$HCV = (P_v - P_s) / P_s$, donde P_v es el peso verde del combustible; y P_s es el peso seco, obtenido mediante secado en laboratorio a 100°C durante 24 h.

Por otro lado, se ha tomado una imagen cenital de cada parcela mediante una fotografía con dron (UAV) para una mejor estimación de la cobertura de cada especie, complementaria a la de la ortofotografía más reciente del año 2018 (Figura 3).

El laboratorio de referencia ha sido el del Centro Forestal (CEFOR) ubicado en Menut (Mallorca).

2.5. Análisis satelital

La existencia de sensores de diversas plataformas satelitales, en modo abierto, permite obtener, de forma sistemática, información referente a distintos índices espectrales de diversa formulación a partir de la combinación de sus bandas. La correlación entre los índices espectrales en una determinada ubicación (e.g. NVDI) con los valores de humedad del combustible vivo subyacente ha sido analizada en diversos trabajos, también para la cuenca mediterránea (e.g. CHUVIECO et al., 2004; YEBRA et al. 2013).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que la determinación empírica de la humedad del combustible vivo a lo largo del tiempo, en base a estos índices como variable independiente, tiene limitaciones importantes para tener en cuenta: depende de su resolución temporal y espacial, o de las distintas especies a representar en el caso de zonas heterogéneas, o de factores topográficos, etc. (MARINO et al. 2020). Para el presente trabajo, se han obtenido los datos del índice NVDI de Sentinel-2 (Copernicus) a una resolución espacial de 10 m a partir de la siguiente expresión:

$NVDI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, donde NIR (B8) es la banda infrarroja cercana y Red (B4) la banda visible roja (ROUSE et al., 1974), expresándose en un valor entre -1 y 1.

El paquete de datos de NVDI se ha obtenido a partir del servidor de Copernicus mediante la plataforma de *Google Earth Engine* durante el periodo de estudio. Para este intervalo de 12

meses se ha obtenido el conjunto de datos de forma independiente para cada parcela de muestreo, e incluyendo el valor medio ponderado de NVDI de los píxeles incluidos en un buffer circular de 20 m de diámetro respecto al centro de gravedad del muestreo. Para cada buffer se han incluido entre 2 y 4 píxeles, con su valor ponderado por su representación areal, y siempre y cuando esté incluido al menos un 0,5% del píxel y su valor no sea 0. Se han filtrado los datos mediante la máscara de nubes para descartar valores nulos o fuera de rango.

Una vez obtenidas las series de datos, se ha generado la curva polinómica de grado 2 para cada parcela y se han descartado los valores por debajo de 0,5 (500 nm). Complementariamente se han filtrado y descartado manualmente valores extremos de la curva que normalmente coinciden con la presencia de sombras o nubes altas no detectadas de forma automática por la máscara.

Seguidamente se han emparejado los datos de humedad del combustible vivo para cada parcela y réplica, con los valores de NVDI de la fecha más cercana al muestreo, estableciéndose un máximo de 6 días. En el caso de superposición de imágenes satelitales, se ha hecho la media de los dos valores extraídos. Para cada fecha de muestreo en cada parcela, los valores de NVDI son los mismos, independientemente de la especie.

El valor del índice de NVDI de cada parcela puede tener una menor o mayor correlación con los valores reales de humedad del combustible, aunque, en cualquier caso, lo será con la especie de mayor presencia en términos de contenido de agua por área foliar. Por limitaciones propias del presente estudio, de forma indirecta se ha reflejado esto mediante la ponderación de la humedad del combustible vivo por fecha y parcela (LFMC esp), a través del porcentaje de cobertura por especie en cada parcela (Cov esp):

$$LFMC\ Int = \sum_{esp1}^{esp\ n} n\ LFMC_{esp\ n} \times Cov_{esp\ n} \text{ (para cada parcela)}$$

De este modo, el cálculo de la humedad ponderada del combustible vivo (LFMC Int) puede expresar más fidedignamente y de forma indirecta la actividad fotosintética, de forma global para cada parcela e integrando proporcionalmente el conjunto de especies, en aras de una posible mayor correlación con los datos NVDI en cada momento.

2.6. Análisis estadístico

El análisis de correlación se ha efectuado mediante la prueba de significancia de las relaciones entre LFMC y LFMC Int con el NVDI, calculado para todo el periodo de estudio, estimándose el coeficiente de correlación también de forma separada por especies. El análisis de la varianza se ha efectuado para las variables independientes observadas como la especie, la fecha o el NVDI. Complementariamente se han realizado múltiples comparaciones de tratamientos (LSD) para el conjunto de especies. En todos los casos se han usado distintas librerías sobre R (v. 1.2.5033).

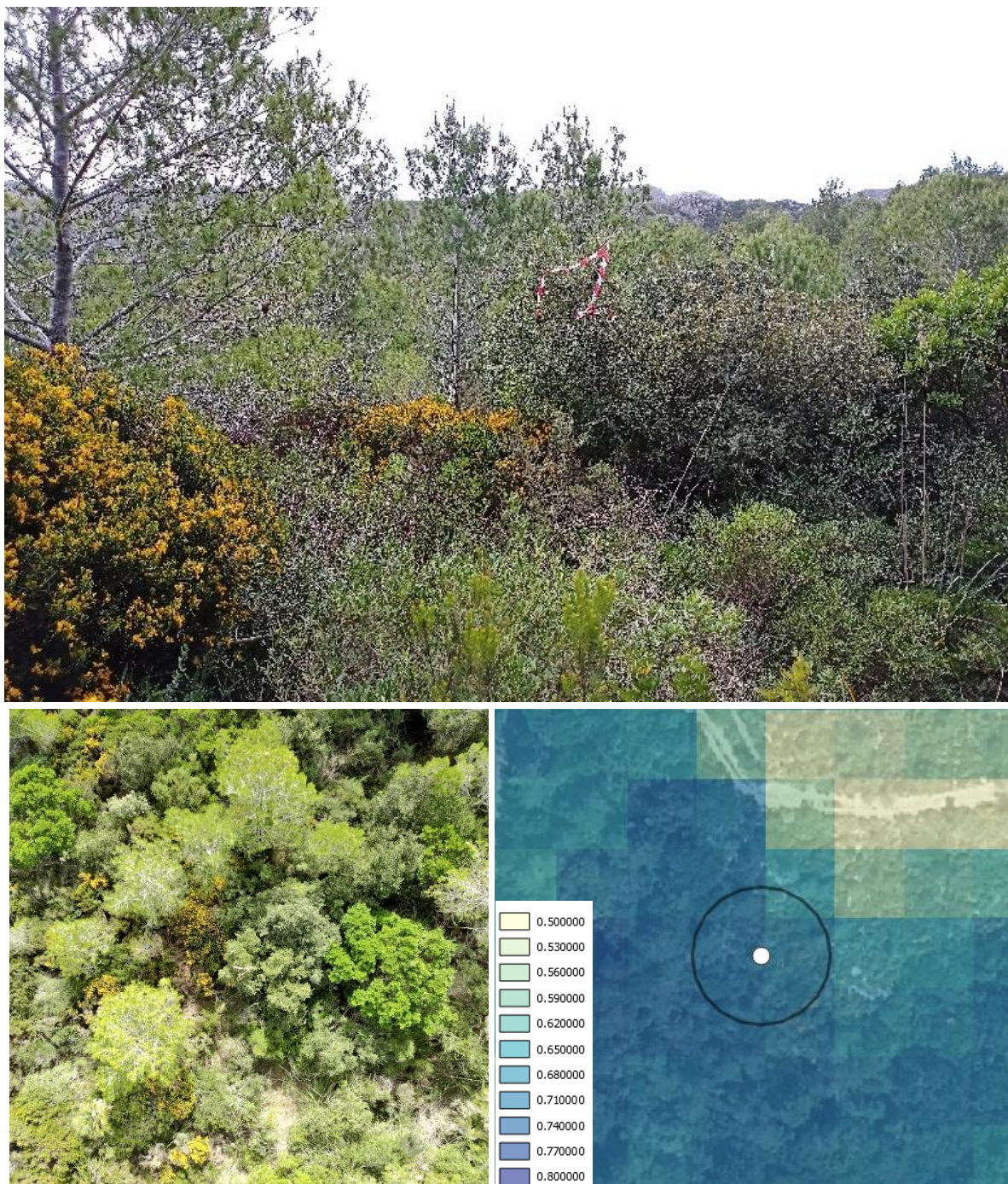


Figura 3. Ejemplo de una parcela de muestreo (Parc. 6), con fotografía a la altura del suelo y con fotografía cenital efectuada con dron, en ambos casos con la baliza central visible. Abajo a la derecha, detalle del centro y perímetro de la parcela circular de 20 m de diámetro, sobre el raster del NVDI (píxel de 10 m) de la imagen de Sentinel (S2) de día 11/02/2020 (corte < 500), sobre ortofoto de 2018.

3. Resultados

3.1. Muestreo de la humedad del combustible fino

Respecto al muestreo de la humedad del combustible vivo (LFMC), durante el periodo de 12 meses se han analizado 1078 réplicas de muestras de combustible fino vivo de 9 especies distintas, en un total de 8 parcelas de muestreo (Tabla 4). Estas muestras se han recogido durante un total de 82 visitas de campo distribuidas en 15 periodos de muestreo. Se han muestreado con mayor intensidad *Pinus*, *Olea*, *Pistacia* y *Erica* puesto que aparecen en la mayor parte de las parcelas.

Tabla 4. Réplicas del muestreo por especie y parcela.

Especie	Parcela de muestreo								Total	%
	2	3	5	6	7	8	9	10		
<i>Ph</i>	31	37	30	27	27	21		33	206	19%
<i>Oe</i>	31	36	31	1	1	21	26	32	179	17%
<i>Pl</i>	31	37	31	28	28	21	27	33	236	22%
<i>Em</i>	31	37	31	23	25	21			168	16%
<i>Am</i>	30		31	25					86	8%
<i>Cm</i>			15		27		25	33	100	9%
<i>Ca</i>					6			30	36	3%
<i>Qi</i>			15	25					40	4%
<i>Ro</i>					27				27	3%
Total	154	147	184	129	141	84	78	161	1078	
%	14%	14%	17%	12%	13%	8%	7%	15%		
Jornadas	11	13	11	10	10	7	9	11	82	

La distribución de frecuencias de las muestras se expone en los histogramas de la Figura 5: englobando la totalidad del periodo de muestreo, para todas las réplicas, por un lado, y por cada especie estudiada, por el otro. En la Figura 6.1 y 6.2 se muestra la evolución del contenido de humedad del combustible fino vivo de las 9 especies muestreadas a lo largo del estudio.

Para la totalidad de las réplicas, se establece una media de valores de LFMC para todas las parcelas e íntegramente para la totalidad del intervalo de toma de muestras, de 103,1 % (mín.: 38,8%; máx.: 212,5%; índice intercuartílico IRQ: 85,6% – 116,8%). En la Tabla 5 se representan los valores medios de humedad por especie y mes de muestreo, las cuales podrían representar los umbrales de comportamiento extremo para tener en cuenta en el caso de su valor mínimo medio por mes.

Respecto a los rangos de humedad, destaca *Pinus*, *Pistacia* y *Quercus*, con unas amplitudes bajísimas (14,3-16,6%) durante el año de estudio y teniendo en cuenta su elevado número de réplicas repartidas en casi todas las parcelas.

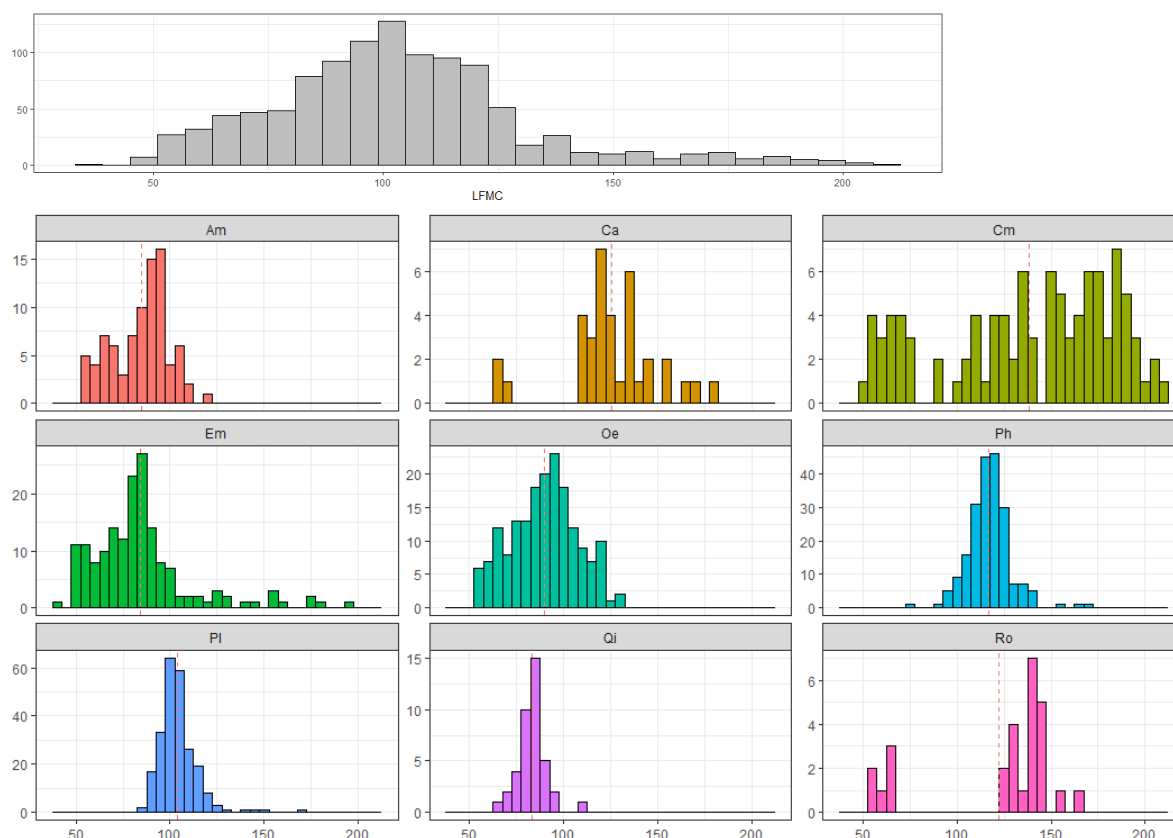


Figura 5. Histograma de total de muestras, e histograma de cada especie durante todo el periodo de muestreo (línea vertical discontinua representa la media). Especies: *Pinus halepensis* (Ph), *Cistus albidus* (Ca), *Cistus monspeliensis* (Cm), *Rosmarinus officinalis* (Ro), *Olea europaea* (Oe), *Quercus ilex* (Qi), *Erica multiflora* (Em), *Pistacia lentiscus* (Pl), *Ampelodesmos mauritanicus* (Am)

Respecto a la dinámica temporal por especies, la humedad de los arbustos *Cistus* (germinador) y *Erica* (rebrotador) ha mostrado más dispersión y asimetría respecto al resto, mucho más ajustada y menos variable a lo largo del estudio. En definitiva, *Pinus*, *Pistacia* y *Quercus*, y en menor medida *Olea* y *Ampelodesmos*, han tenido un comportamiento ciertamente constante, siendo el resto de las especies más sensibles a la transición estacional, produciéndose la recuperación de setiembre a octubre y la pérdida de junio a julio.

Por meses, ha sido claramente el mes de agosto el que ha concentrado humedades medias más bajas (a excepción de *Quercus*). Respecto a los valores más altos, existe mucha variabilidad (junio, setiembre o diciembre), posiblemente por razones meteorológicas. En el caso concreto de los valores de humedad de *Cistus*, éstos han reaccionado fuertemente al alza durante la transición de setiembre a octubre, recuperando humedades por encima del 120%. Por otro lado, de las especies que han mostrado valores de humedad absoluta más baja, destaca *Erica* que integra el 51% de las observaciones inferiores al 60% de humedad.

Tabla 5. Réplicas del muestreo por especie y parcela: valores mínimos/máximos medios por mes y número del mes con el valor más extremo en un caso u otro; rango de variación en los 12 meses; media en los 12 meses; y SD.

LFMC (%) Julio 2020 – Junio 2021 (12 meses)

	Valor mínimo medio mes	Mes con el valor mín.	Valor máximo medio mes	Mes con el valor máx.	Rango meses	Media 12 meses	SD
<i>Ph</i>	109,1	5	123,4	9	14,3	117,1	0,8
<i>Oe</i>	68,0	8	101,2	9	33,2	89,6	1,3
<i>Pl</i>	95,8	6	111,0	11	15,2	103,8	0,7
<i>Em</i>	57,2	8	106,4	12	49,2	84,2	2,1
<i>Am</i>	64,1	8	108,3	4	44,3	84,6	1,6
<i>Cm</i>	63,9	8	170,1	1	106,2	138,1	4,5
<i>Ca</i>	65,8	8	146,7	6	80,8	125,8	4,1
<i>Qi</i>	74,1	6	90,7	12	16,6	83,1	1,2
<i>Ro</i>	61,2	8	144,4	6	83,2	122,3	6,6

Meteorológicamente, el periodo de estudio se ha caracterizado por la existencia de déficits de precipitación respecto a la media climática durante bastantes meses. De 2020 destacan las anomalías negativas de lluvia de los meses de julio, octubre y especialmente noviembre. Aun así, septiembre de 2020 presentó una anomalía positiva, así como en especial el mes de enero de 2021, cuando se recupera claramente la lluvia observada respecto al otoño seco. Sin embargo, febrero de nuevo muestra una importante anomalía negativa que luego es parcialmente recuperada entre mayo y junio, siendo una primavera de 2021 muy seca hasta finales de mayo.

Tabla 6. Valores medios y normales (para el periodo 1981-2010) de la precipitación media mensual.

Mes	Valores medios 2020-2021 de precipitación (mm)	Valores medios normales de precipitación (mm)	Anomalía respecto período normal (1981-2010) %
jul-20	2.3	7.4	-68.8
ago-20	28.0	18.6	50.3
sep-20	84.8	50.8	67.2
oct-20	59.9	65.9	-9.1
nov-20	33.5	57.2	-41.4
dic-20	53.0	48.2	10.1
ene-21	93.0	51.2	81.6
feb-21	6.2	47.8	-87.0
mar-21	55.4	25.5	117.5
abr-21	20.9	36.7	-43.1
may-21	59.1	33.8	75.0
jun-21	26.3	12.1	117.1

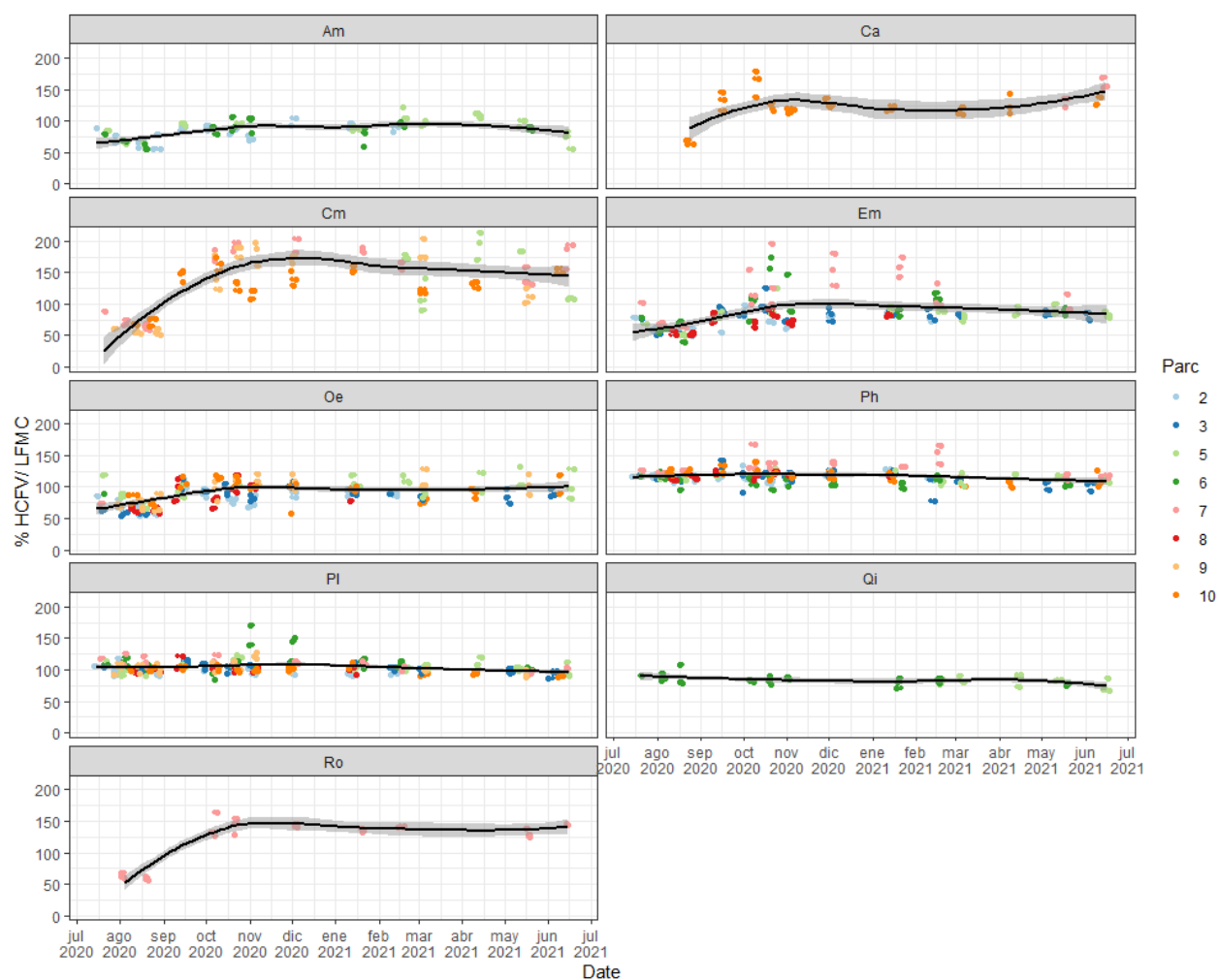


Figura 6.1. Evolución por mes del contenido de LFM de las especies muestreadas (cada punto representa una réplica y cada color una parcela). Curva de ajuste no paramétrico Loess. Especies: *Pinus halepensis* (Ph), *Cistus albidus* (Ca), *Cistus monspeliensis* (Cm), *Rosmarinus officinalis* (Ro), *Olea europaea* (Oe), *Quercus ilex* (Qi), *Erica multiflora* (Em), *Pistacia lentiscus* (Pl), *Ampelodesmos mauritanicus* (Am).

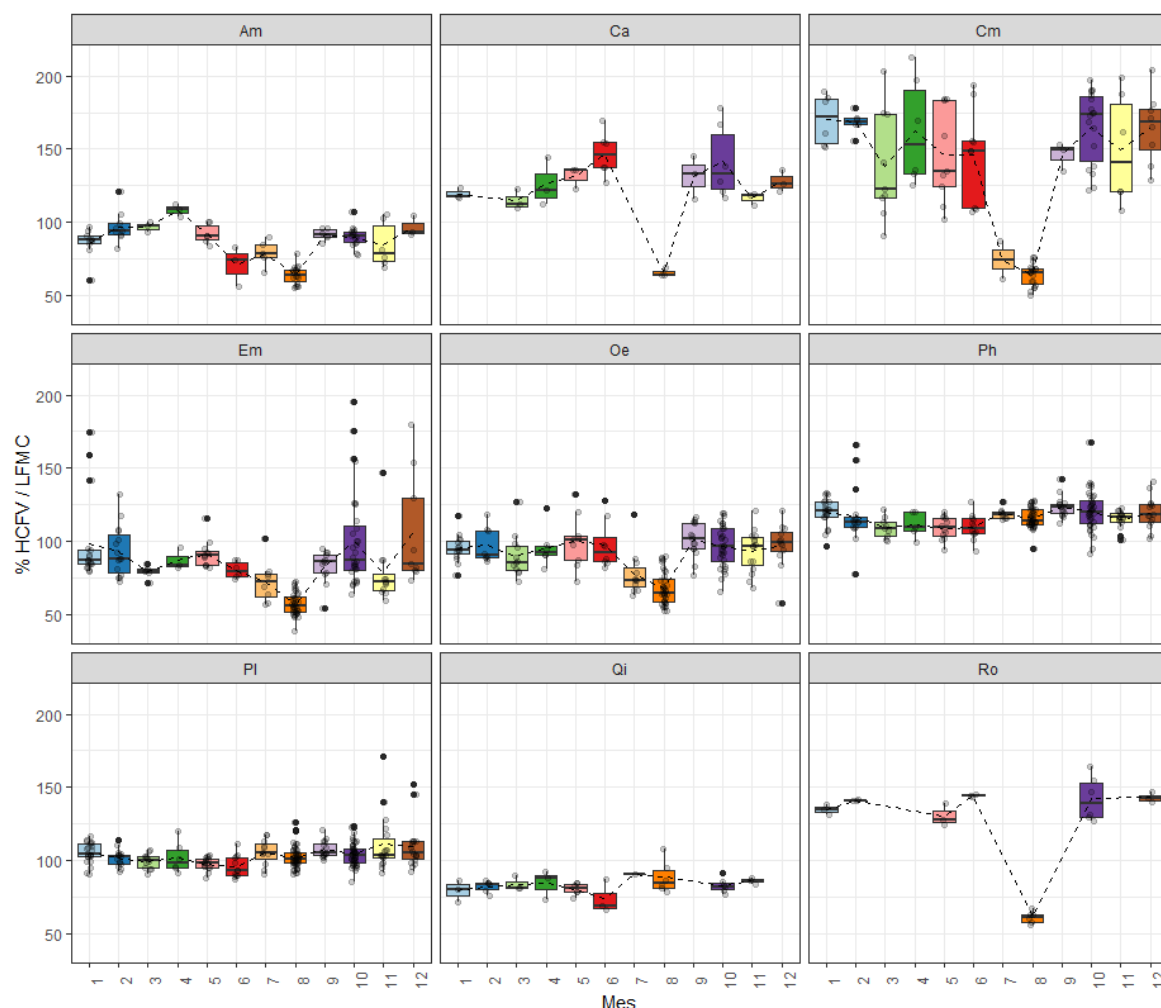


Figura 6.2 Boxplots de evolución del contenido de humedad del combustible fino vivo de las 9 especies muestreadas por mes. Especies: *Pinus halepensis* (Ph), *Cistus albidus* (Ca), *Cistus monspeliensis* (Cm), *Rosmarinus officinalis* (Ro), *Olea europaea* (Oe), *Quercus ilex* (Qi), *Erica multiflora* (Em), *Pistacia lentiscus* (Pi), *Ampelodesmos mauritanicus* (Am)

3.2. Determinación del NVDI

Respeto a los datos satelitales, se han obtenido un total de 71 valores de NVDI de cada fecha de muestreo y por cada parcela (respetando < 6 días de diferencia fecha muestreo – fecha dato satelital; valor medio 1,9 días). En 11 jornadas no ha sido posible a razón obtener el NVDI por la presencia continuada de nubes. Los valores de NVDI han mostrado una tendencia esperable, con un mínimo en verano y un valor medio de 0,710 (mín.: 0,525; máx.: 0,858) (Figura 7.1). Por cada parcela de muestreo, se ha ponderado la cobertura de cada especie (Cov esp), de modo que se han establecido los valores de LFM C Int que aparecen en la Figura 7.2.

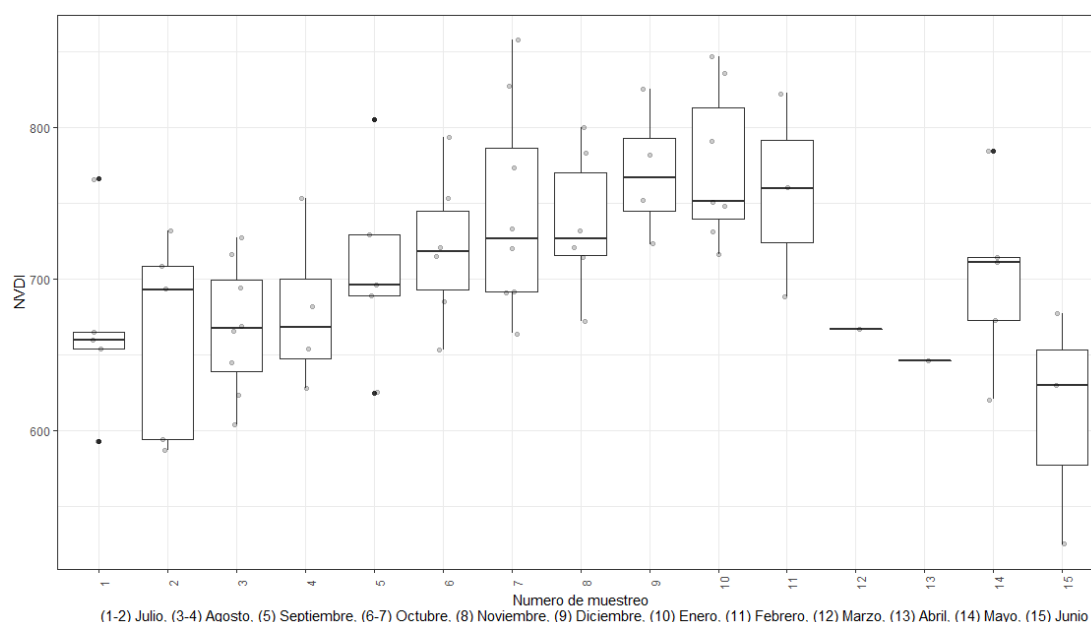


Figura 7.1. Diagrama de caja de los valores obtenidos de NVDI (x1000) por número de muestreo.

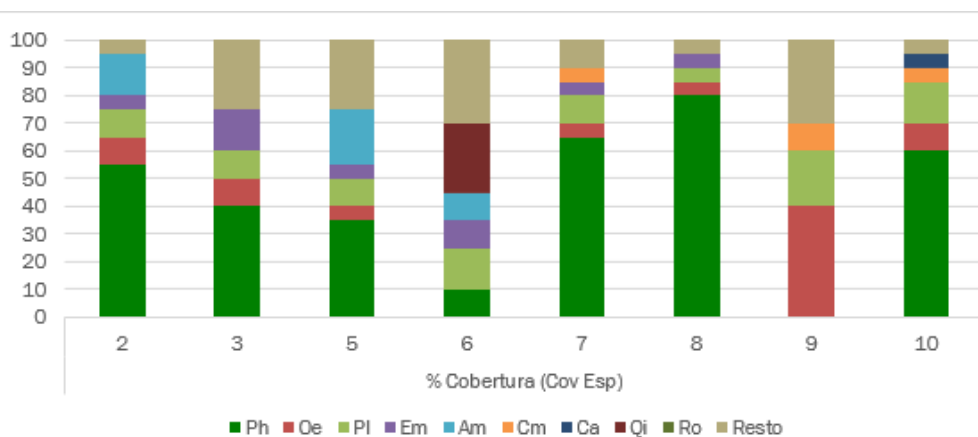


Figura 7.2. Cobertura por especie y parcela.

3.3. Análisis

En el análisis de la varianza, tanto la especie, la fecha de muestreo y el factor parcela, han mostrado relaciones significativas con la humedad del combustible observada ($p < 0,001$). En este sentido, complementariamente a través del análisis LSD, se sugiere cierta agrupación entre germinadoras obligadas (*Cistus a.*, *Cistus m.* y *Rosmarinus*) y en el otro extremo rebrotadoras (*Erica*, *Ampelodesmos*, *Quercus* y *Olea*).

La correlación de la actividad fotosintética (NVDI) con la humedad integrada del combustible (LFMC Int) muestra una relación de $R^2 = 0,44$ ($p < 0,001$), aunque con bastante dispersión de los datos (Figura 8). La correlación todavía es menor ($R^2 = 0,30$ $p < 0,001$) entre los valores de LFMC por réplica y los de NVDI observado en cada parcela y fecha de muestreo.

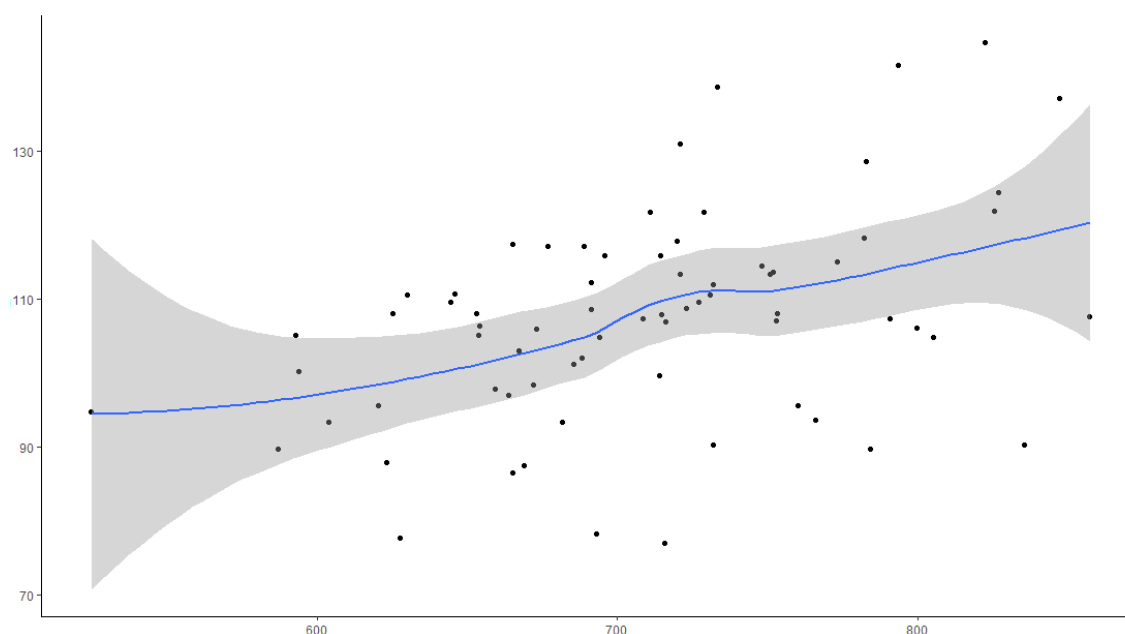


Figura 8. Correlación de la humedad del combustible integrada (LFMC Int) con el NVDI observado en cada fecha de muestreo durante todo el periodo. Curva de ajuste no paramétrico Loess.

4. Discusión

Considerando estudios similares (VIEGAS et al., 2001; SORIANO Y QUILEZ, 2017; MARTIN-STPAUL et al., 2018), en la Tabla 6 se hace una comparación de los datos observados con los datos publicados para cada especie, realizados a partir de una metodología de muestreo similar.

Tabla 7. Comparativa LFMC (%) datos muestreados respecto a estudios previos.

	Rango absoluto ¹	Datos existentes absolutos (media, mín. y máx.)		
		2	3	4
<i>Pinus halepensis</i> (Ph)	107-135	105-155	-	103, 67-176
<i>Olea europaea</i> (Oe)	56-118	-	-	90, 46-117
<i>Pistacia lentiscus</i> (Pl)	97-139	90-120	-	-
<i>Erica multiflora</i> (Em)	52-154	-	-	80, 38-148
<i>Ampelodesmos mauritanicus</i> (Am)	61-97	-	-	-
<i>Cistus monspeliensis</i> (Cm)	55-192	55-205	-	126, 40-198
<i>Cistus albidus</i> (Ca)	66-161	-	35-134	146, 45-245
<i>Quercus ilex</i> (Qi)	80-91	70-100	54-95	83, 59-137
<i>Rosmarinus officinalis</i> (Ro)	60-144	80-190	35-136	114, 41-232

¹ Valor abs. del presente estudio (media de mínimo tres réplicas en una parcela)

² VIEGAS et al., 2001 (> 1 año), zona Cataluña (España)

³ MARTIN-STPAUL et al., 2018 (> 1 año), zonas mediterráneas de Francia

⁴ SORIANO Y QUILEZ, 2017 (>1 año; 22 meses), zona Comunidad Valenciana (España).

Existen ciertas analogías en algunas especies respecto a trabajos anteriores, tanto en valor medio como en sus rangos de humedad, aunque resulta difícil una comparación directa puesto que se refieren a zonas geográficas distintas e intervalos variables que pueden incorporar situaciones meteorológicas ocurridas extremas, especialmente de sequía. Además, es posible que existan algunas diferencias metodológicas significativas: por ejemplo, para *Pinus*, se puede dar el caso que se hayan incluido durante el muestreo parte de combustible no vivo perteneciente a las acículas muertas en suspensión en las copas, como criterio igualmente válido. En este sentido, se ha estimado durante el presente estudio que incluir parte de estas disminuye la LFMC alrededor de un 15-25% variable entre julio y setiembre desde que empiezan a aparecer hasta que caen al suelo. Además, el factor insularidad (altas humedades relativas ambientales durante la estación seca) puede haber influido en frenar la tendencia hacia valores mínimos de humedad para especies como *Pinus* o *Pistacia*. En cualquier caso, en líneas generales y diferenciado arbustivas-germinadoras con el resto, los datos son similares, así como el momento de recuperación post-verano, el cual ha sido observado de forma similar.

A nivel del índice espectral NVDI como variable explicativa de los valores de LFMC a lo largo del tiempo, esta no ha resultado una herramienta suficientemente consistente a razón de la dispersión estadística de los datos analizados, al menos en lo que se refiere al periodo estudiado. Es posible que la integración de demasiadas especies y en parcelas muy heterogéneas entre sí haya sido un factor determinante para no obtener una relación significativa, así como la sobrerrepresentación de la cobertura de especies muy poco variables a lo largo del tiempo como *Pinus*. Otros estudios, como el de MARINO et al. (2020), han obtenido mejores correlaciones lineales entre LFMC y NVDI (u otros como VARI o VI_g) aunque con datos procedentes de MODIS.

En relación con los caracteres funcionales y características fisiológicas de las distintas especies, existe un agrupamiento entre rebrotadoras y germinadoras obligadas, tanto en los valores, rangos y dinámicas temporales de la humedad del combustible. Tal y como se ha observado en otros estudios (e.g. Nolan et. al, 2020), las especies *Cistus* y *Rosmarinus*, como germinadoras obligadas post-incendio, presentan patrones en la forma de la raíz más superficiales que en el conjunto de rebrotadoras, éstas con un patrón más profundo, hecho que se ha demostrado como un factor importante en su contenido de agua e indirectamente de la humedad de la planta. Este factor (medido como la contribución del agua de los horizontes superficiales del suelo al bombeo de agua del xilema), juntamente como el potencial hídrico de la hoja y su regulación estomática, podrían explicar este comportamiento de la humedad del combustible vivo, generando modelos de mayor consistencia que los de los índices de sequía o incluso del uso del NVDI de Sentinel.

Las germinadoras obligadas arbustivas han llegado a valores más altos de humedad que no el resto, posiblemente en respuesta a una mayor contribución del agua superficial como fuente de agua de la planta en el periodo post-verano, momento en el que también generan hojas nuevas. Contrariamente, durante la época de mayor sequía (julio-setiembre), este carácter funcional ha contribuido a lo contrario, a reducir la humedad del combustible en *Rosmarinus* y *Cistus*. Queda por determinar la razón por la que *Erica*, como rebrotadora, muestra un carácter intermedio, con rangos de humedad amplios por mes (57-106%), valores mínimos bajos y cierta dinámica post-verano en respuesta a las lluvias de otoño. Igualmente, cabe destacar la baja humedad de las germinadoras del árbol *Quercus* (80-91%) o del hemicriptófito Am (60-97%), durante todo el periodo de estudio. También resulta de interés la bajísima variabilidad, aun manteniendo valores moderadamente elevados de humedad, de *Pinus*.

En cuanto a este último respecto, resulta curioso también como los distintos mecanismos de resistencia a la sequía (especies evitadoras y especies tolerantes) parecen no influir en la

respuesta de la LPMC. Por ejemplo, dos especies con diferentes estrategias (*Pinus* como evitadora y *Quercus* como especie tolerante) tienen una respuesta muy similar, con una variación muy baja en ambos casos. Sin embargo, sí se parece observar una muy ligera tendencia a la baja desde el inicio del año 2021, común tanto a dichas especies como en PI, otra especie cuya humedad se mantiene extremadamente constante. Otras especies, sin embargo, muestran una tendencia inversa en el año 2021, con tendencia al alza en *Cistus albidus* y ligeramente en *Olea* y *Rosmarinus*. Esta tendencia al alza está más marcada en *Cistus albidus*, iniciándose concretamente la recuperación de la humedad en enero. Resulta lógico pensar que esta recuperación está relacionada con las lluvias de inicio de año, lo cual de ser así implicaría que dichas especies son más sensibles a las lluvias, y tienen una respuesta más rápida.

Es remarcable la diferencia de las dinámicas temporales aquí observadas con otras de reciente publicación (COSTA-SAURA et al., 2021). En dicho trabajo, las oscilaciones en el periodo seco son mucho más marcadas, con desplomes de humedad de hasta 75% en el caso de *Rosmarinus* (el más marcado).

5. Aplicaciones en la gestión de incendios

Consideramos que el simple conocimiento de los datos de humedad del combustible vivo en el ámbito insular, en base al estudio de un año, puede tener una aplicación positiva directa de gran interés para el operativo de prevención y extinción de incendios, especialmente en lo que se refiere al análisis y simulación de incendios forestales, tanto desde la óptica de la extinción como de la prevención. Si el análisis de la humedad continúa desarrollándose, aunque sea solamente durante los meses de mayor peligro de incendio (marzo-setiembre), y comprimiéndolo a determinadas parcelas y a especies indicadoras, se podría mejorar notablemente la información aplicable a escala operativa. En este sentido es vital aumentar la eficiencia logística del muestreo para que sea realmente realizable, teniendo en cuenta las limitaciones de recursos potencialmente disponibles. A modo de resumen, la aplicación de este conocimiento puede recaer en los siguientes vectores de mejora a desarrollar en un futuro:

- a) Mejora en la simulación de la propagación de incendios forestales en curso, a partir del conocimiento de la variable de la humedad del combustible vivo por especie y periodo del año y, por lo tanto, por tipología de formación forestal.
- b) Adelanto en la aproximación de las épocas de mayor riesgo de incendio forestal, a partir de los datos en tiempo real de especies indicadoras.
- c) Mejora en la determinación de umbrales de humedad del combustible vivo de especies representativas o similares a partir de los cuales se han reportado comportamientos extremos (e.g. Nolan et al., 2016).
- d) Análisis del comportamiento de incendios forestales producidos en relación con la humedad del combustible vivo de las especies afectadas, precisamente para la incorporación de umbrales no reportados.
- e) Integración en una base de datos geográficamente mucho más amplia de cara a compartir conocimientos e información operativa.

Por otro lado, resulta conveniente integrar como variable relacionada con la humedad el índice de sequía, ya sea del modelo canadiense FWI (Drought Code) o del modelo americano Keetch-Byram Drought Index. En este sentido, ambos están disponibles, aunque solamente por categorías, en el European Forest Fire Information System (EFFIS) de Copernicus y a partir de datos el ECMWF. En los dos casos, existen trabajos similares que correlacionan estos índices con la LPMC, con ajustes no excesivamente consistentes (Nolan et al., 2020).

En definitiva, el análisis de humedad del combustible en tiempo real durante la campaña de prevención y extinción de incendios, especialmente si puede acabar infiriéndose desde la óptica

de los datos satelitales disponibles, supone una herramienta muy útil para toda la escala operativa: soporte para una mejor organización y modulación de las distintas capacidades de extinción, análisis de la propagación incendios, quemas prescritas, etc.

6. Agradecimientos

A Victor Resco (ETSEA-UdL), a los compañeros de la UT-902 de la GVA i a Carmen Romero.

7. Bibliografía de referencia

AGUADO, I.; CHUVIECO, E.; BORÉN, R.; NIETO, H.; 2007. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. *Int. J. of Wildland Fire* 16, 390-397. doi:10.1071/WF06136

ALEXANDER, M.E.; CRUZ, M.G.; 2013. Assessing the effect of foliar moisture content on the spread rate of crown fires. *Int. J. of Wildland Fire* 22, 415-427. doi:10.1071/WF12008

BALAGUER-ROMANO, R.; DÍAZ-SIERRA, R.; MADRIGAL, J.; VOLTAS, J.; RESCO DE DIOS, V.; 2020. Needle Senescence Affects Fire Behavior in Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) Stands: A Simulation Study. *Forests* 11, 1054. doi:10.3390/f11101054

BROWN A.A.; DAVIS K.P.; 1973. Forest Fire: Control and Use. McGraw-Hill. 686 pp. New York.

CASTRO, X.; GABRIEL DE FRANCISCO, E.; SERRANO, E.; MONTSERRAT, D.; TUDELA A.; CANYAMERES, E.; 2007. Valoración de la humedad en el seguimiento del estado de la fracción fina viva de la vegetación con relación al riesgo de incendio forestal. Servicio de Prevención de incendios forestales. *Wildfire Sevilla – IV Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales*. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. Sevilla.

CHUVIECO, E.; COCERO, D.; RIAÑO, D.; MARTIN, P.; MARTINEZ-VEGA, J.; RIVA, J.; PEREZ-CABELLO, F.; 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment* 92, 322-331. doi:10.1016/j.rse.2004.01.019

CHUVIECO, E.; GONZÁLEZ, I.; VERDÚ, F.; AGUADO, I.; YEBRA, M.; 2009. Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem. *Int. J. of Wildland Fire* 18, 430-441. doi:10.1071/WF08020

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 Sensing* 13, 3726. doi:10.3390/rs13183726

COUNTRYMAN, CLIVE M.; DEAN, WILLIAM A. 1979. Measuring moisture content in living chaparral: a field user's manual. *General Technical Report PSW-036*. Berkeley, CA, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 28 pp. Disponible en: https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr036/psw_gtr036.pdf [Consulta: 19/03/2022]

DOMENECH, O; 2015. Incendis forestals a les Illes Balears: 25 anys de dades estadístiques per a la defensa integrada i la conservació del patrimoni natural. En: Llibre Verd de Protecció

d'Espècies a les Balears, 487-494. Govern de les Illes Balears i Societat d'Història Natural de les Balears, Monografia SHNB Núm. 20. Illes Balears. doi:10.13140/RG.2.1.2267.2486

DENNISON P.E.; MORITZ M.A.; 2009. Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: a threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation. *Int. J. of Wildland Fire* 18, 1021-1027. doi: 10.1071/WF08055

JOLLY, W.; JOHNSON, D.; 2018. Pyro-ecophysiology: shifting the paradigm of live wildland fuel research. *Fire* 1, 8. doi:10.3390/fire1010008

KEANE R.E.; 2015. Fuel Fundamentals. En: *Wildland Fuel Fundamentals and Applications*. 3-107. Springer, Missoula. doi:10.1007/978-3-319-09015-3_2

LLORENS, L.L.; GIL, L.; TÉBAR, F.J.; 2007. La vegetació de l'illa de Mallorca. Bases per a la interpretació i gestió d'hàbitats. Conselleria de Medi Ambient. Govern de les Illes Balears. Associació Jardí Botànic de Palma. S.A. de litografia. Palma de Mallorca.

FAN, L.; WIGNERON, J.P.; XIAO, Q.; AL-YAARI, A.; WEN, J.; MARTIN-STPAUL, N.; DUPUY, J.L.; PIMONT, F.; AL BITAR, A.; FERNANDEZ-MORAN, A.; KERR, Y.H.; 2018. Evaluation of microwave remote sensing for monitoring live fuel moisture content in the Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment* 205, 210-223. doi: 10.1016/j.rse.2017.11.020

LOZANO, O.M.; SALIS, M.; AGER, A.A.; ARCA, B.; ALCASENA, F.J.; MONTEIRO, A.T.; FINNEY, M.A.; DEL GIUDICE, L.; SCOCCIMARRO, E.; SPANO, D.; 2017. Assessing Climate Change Impacts on Wildfire Exposure in Mediterranean Areas. *Risk Analysis* 37, 1898-1916. doi:10.1111/risa.12739

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 Sensing* 12, 2251. doi:10.3390/rs12142251

MARTIN-STPAUL, N.; PIMONT, F.; DUPUY, J.L.; RIGOLOT, E.; RUFFAULT, J.; FARGEON, H.; CABANE, E.; DUCHÉ, Y.; SAVAZZI, R.; TOUTCHKOV, M.; 2018. Live fuel moisture content (LFMC) time series for multiple sites and species in the French Mediterranean area since 1996. *Annals of Forest Science* 75, 57. doi:10.1007/s13595-018-0729-3

MATTHEWS, S.; 2013. Dead fuel moisture research: 1991–2012. *Int J Wildland Fire* 23, 78-92. doi:10.1071/WF13005

MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE; 2012. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Cuarto Inventario Forestal de Illes Balears - IFN4. Disponible en: http://www.caib.es/sites/xarxaforestal/es/inventario_forestal_nacional-19214/archivopub.do?ctrl=MCRST472ZI139398&id=139398 [Consulta: 19/03/2022]

NOLAN, R.H.; BOER, M.M.; RESCO DE DIOS, V.; CACCAMO, G.; BRADSTOCK, R.A.; 2016. Large-scale, dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activity across southeastern Australia. *Geophys. Res. Lett.* 43, 4429-4438. doi:10.1002/2016GL068614

NOLAN, R.H.; HEDO, J.; ARTEAGA, C.; SUGAI, T.; RESCO DE DIOS, V.; 2018. Physiological drought responses improve predictions of live fuel moisture dynamics in a Mediterranean forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 263, 417-427. doi:10.1016/j.agrformet.2018.09.011

NOLAN, R.H.; BLACKMAN, C.J.; RESCO DE DIOS, V.; CHOAT, B.; MEDLYN, B.E.; LI, X.; BRADSTOCK, R.A.; BOER, M.M.; 2020. Linking Forest Flammability and Plant Vulnerability to Drought. *Forests* 11, 779. doi:org/10.3390/f11070779

PAUSAS J.G.; 2012. Incendios forestales. Catarata-CSIC. 199 pp. Madrid.

PAUSAS J.G.; KEELEY J.E.; 2014. Abrupt climate-independent fire regime changes. *Ecosystems* 17, 1109-1120. doi:10.1007/s10021-014-9773-5

PELLIZZARO, G.; CESARACCIO, C.; DUCE, P.; ANDREA, V.; ZARA, P.; 2007. Relationships between seasonal patterns of live fuel moisture and meteorological drought indices for Mediterranean shrubland species. *Int. J. of Wildland Fire* 16, 232-241. doi:10.1071/WF06081

PYNE, S.J.; ANDREWS, P.L.; LAVEN, R.D.; 1996. Introduction to Wildland Fire. John Wiley & Sons. 769 pp. New York.

RESCO DE DIOS, V.; 2020. Plant-Fire Interactions, Applying Ecophysiology to Wildfire Management. Springer International Publishing, Cham. 208 pp. doi:10.1007/978-3-030-41192-3

RESCO DE DIOS, V.; CUNILL CAMPRUBÍ, A.; PÉREZ-ZANÓN, N.; CARLOS PEÑA, J.; MARTÍNEZ DEL CASTILLO, E.; RODRIGUES, M.; YAO, Y.; YEBRA, M.; VEGA-GARCÍA, C.; M. BOER, M.; 2021. Convergence in critical fuel moisture and fire weather thresholds associated with fire activity in the pyroregions of Mediterranean Europe. *Science of The Total Environment*, 151462, (article in press). Disponible en: <https://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2021/11/09111332/RescodeDiosetal2021.pdf> [Consulta: 19/03/2022]

ROSSA, C.; VELOSO, R.; FERNANDES, P.; 2016. A laboratory-based quantification of the effect of live fuel moisture content on fire-spread rate. *Int. J. of Wildland Fire* 25, 569-573. doi:10.1071/WF15114

ROUSE, J.W. JR.; HAAS, R.W.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.H.; HARLAN, J.C.; 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation [Great Plains Corridor]. Type III Final Report; NASA/GSFC: Greenbelt, MD, USA.

ROTHERMEL, R.C.; 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-GTR-143. Disponible en: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr143.pdf [Consulta: 19/03/2022]

SORIANO, J. L.; QUÍLEZ, R.; 2017. Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. En 7º Congreso Forestal Español (7 CFE01-398). Plasencia. Disponible en: <https://7cfe.congresoforestal.es/content/analisis-de-la-humedad-del-combustible-vivo-en-la-comunitat-valenciana-0> [Consulta: 19/03/2022]

SULLIVAN A.L.; 2009. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: empirical and quasiempirical models. *Int. J. of Wildland Fire* 18, 369–386. doi:10.1071/WF06142

VIEGAS, D.X.; PIÑOL, J.; VIEGAS, M.T.; OGAYA, R.; 2001. Estimating live fine fuel moisture content using meteorologically based indices. *Int. J. of Wildland Fire* 10, 223-240. doi:10.1071/WF01022

VINEY N.R. (1991). A review of fine fuel moisture modelling. *International Journal of Wildland Fire*

YEBRA, M.; DENNISON, P.; CHUVIECO, E.; RIAÑO, D.; ZYLSTRA, P.; RAYMMOND HUNT JR., 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 Sensing of Environment* 136, 455-468. doi:10.1016/j.rse.2013.05.029