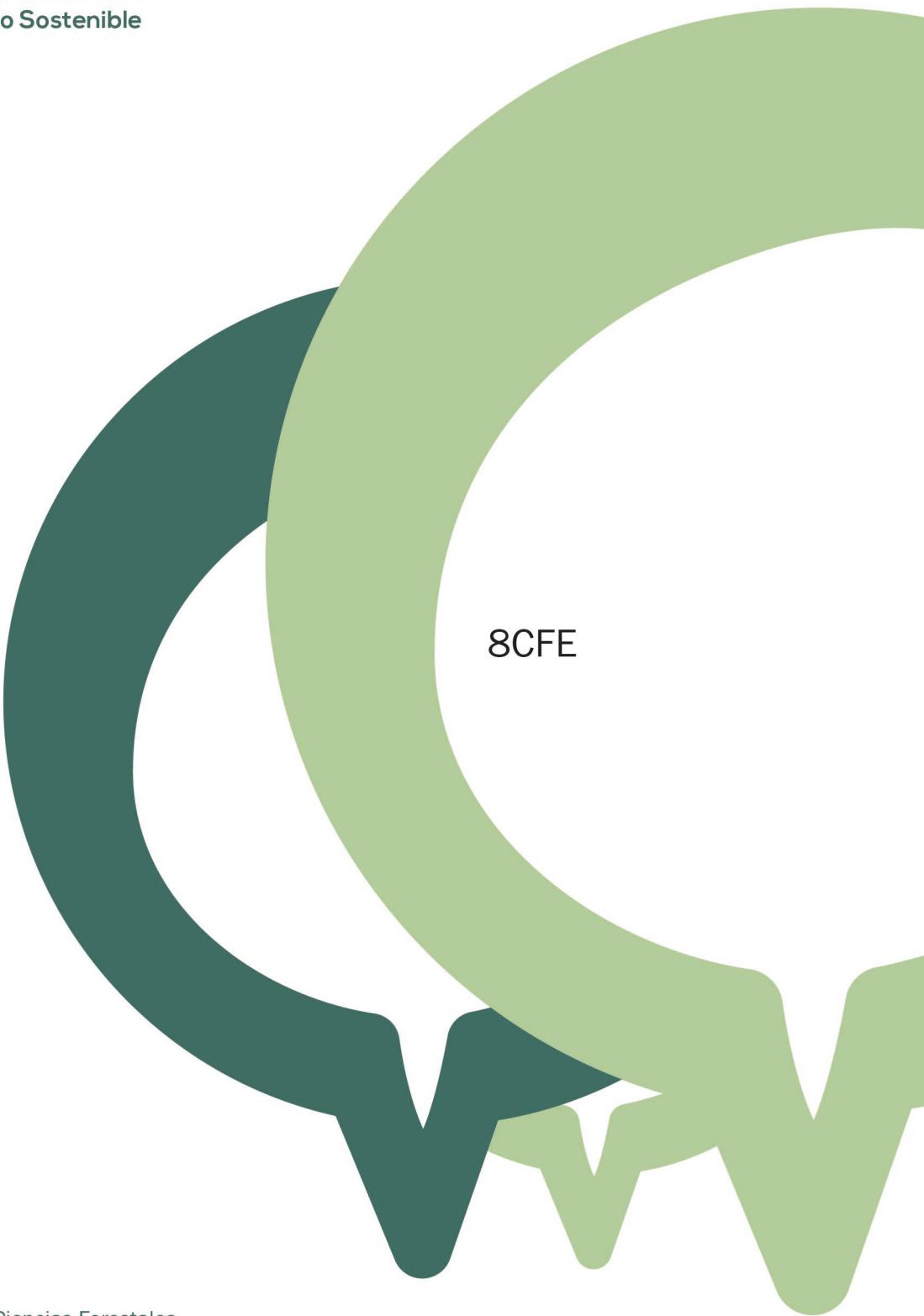




8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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



La producción de setas está controlada por la producción primaria y las señales climáticas en pinares mediterráneos

OLANO, J. M.¹, MARTÍNEZ-RODRIGO, R.^{1,2}, ALTELARREA, J. M.³, ÁGREDA, T.⁴, FERNÁNDEZ-TOIRÁN, M.¹, GARCÍA-CERVIGÓN, A. I.⁵, RODRÍGUEZ-PUERTA, F.^{1,2}, ÁGUEDA, B.^{1,2}

¹ EIFAB - iuFOR. Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, E-42004 Soria, España

² föra forest technologies, Campus Duques de Soria, E-42004 Soria, España

³ Fundación Cesefor, Calle C, E-42005 Soria, España

⁴ Fundación Parque Científico de la Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, E-42004 Soria, España

⁵ Departamento de Biología y Geología, Universidad Rey Juan Carlos. C / Tulipán s / n, E-28933 Móstoles (Madrid), España

Resumen

Los hongos son organismos claves en el funcionamiento de los ecosistemas. Las condiciones climáticas son el principal factor para que se produzcan las setas, muy variables anual e interanualmente, pero no hay que olvidar la composición, la edad y el crecimiento de los bosques. Para evaluar el efecto del clima y la productividad forestal en la producción de setas, se utilizan dos series de datos de producción en *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris* de 22 y 24 años, respectivamente. Se modelizan las producciones de setas, incluyendo las de las principales especies de interés económico.

Se realizan tres modelos diferentes, para la predicción de producción de setas, con datos climáticos (precipitación y temperaturas mínimas), con datos de teledetección (NDVI y humedad del suelo) y el modelo con la combinación de los datos climáticos y de teledetección, obteniendo el mejor resultado este último. Además, el NDVI, estimador correlacionado con la productividad primaria, del año anterior tiene una correlación directa con la producción de setas.

Se abre así la utilización de datos remotos abiertos para la predicción de cosechas de setas, que gracias a su alta resolución espacial y temporal permitirán la generación de modelos a diferentes escalas.

Palabras clave

Boletus edulis, *Lactarius deliciosus*, RADAR, NDVI, sensores remotos.

1. Introducción

Los hongos desempeñan funciones clave en los ecosistemas forestales, contribuyen al equilibrio de nutrientes del suelo al descomponer la materia orgánica y convertirla en componentes inorgánicos accesibles a las raíces de los árboles. Los hongos micorrícos también forman asociaciones que aumentan la rizosfera de los árboles, lo que eventualmente mejora la disponibilidad de agua y nutrientes, mejora el crecimiento y la supervivencia de los árboles y brinda defensa contra patógenos (Allen, 1991). Entre los productos forestales no maderables, las setas tienen importancia medicinal, comercial, nutricional y recreativa (Küçüker y Başkent, 2017). En la actualidad, la recolección de setas es una actividad en auge entre la población en toda Europa, ya sea por su importancia gastronómica o social. La población local recolecta cada temporada setas para su consumo o para generar rentas complementarias, bien por su venta directa, bien por su explotación turística (Boa, 2005). De hecho, el desarrollo de un sector turístico micológico está teniendo un alto impacto en las zonas rurales poco pobladas, contribuyendo a dosificar su economía y a expandir la temporada turística en la región.

La explotación de setas y por lo tanto el turismo micológico se ven limitados debido a la alta irregularidad que presentan las setas en sus cosechas, a lo que se le suma el efecto del cambio climático, que provoca que la fructificación de los hongos sea cada vez más escasa en los ambientes

mediterráneos (Ágreda et al., 2015). Aunque el manejo forestal puede mejorar la producción de setas silvestres al promover el vigor de los árboles (Tomao et al., 2017), no disminuye la variabilidad interanual impulsada por las condiciones climáticas (Ágreda et al., 2016).

El desarrollo de modelos predictivos confiables para las cosechas de setas es, por lo tanto, una necesidad para la expansión de este sector económico (Tomao et al., 2017). La disponibilidad de series temporales de datos cada vez más largas, de producción de setas y la necesidad de modelizar las producciones de setas, hacen de ello un área de investigación en auge (Alday et al., 2017; Fernández-Toirán et al., 2006; Martínez-Peña et al., 2012). Uno de los mayores condicionantes para la fructificación de las setas son las condiciones climáticas, siendo clave la temperatura en los bosques templados (Sato et al., 2012) y las precipitaciones. Se demuestra en el trabajo de Ágreda et al., (2015) que existen dos señales clave para la fructificación de las setas, estas son las temperaturas del mes de marzo que es cuando se está desarrollando el micelio y las precipitaciones de verano. Además, las temperaturas mínimas afectan a la duración del tiempo de fructificación (Ágreda et al., 2015).

La planificación forestal sostenible de este recurso se apoya en las nuevas herramientas de seguimiento ambiental que ofrecen las tecnologías de la información. En los últimos años las técnicas de teledetección han proporcionado nuevos métodos para adquirir información de los ecosistemas con un menor coste y una cobertura más amplia en relación con los datos de campo (Lefsky et al., 2002). Los datos de la teledetección han producido una inquietud en el sector forestal, por poder monitorear la dinámica forestal en múltiples escalas espaciotemporales (Barrett et al., 2016). Se ha visto que la edad del bosque marca la estructura de la masa y afecta a la producción de setas (Ágreda et al., 2014), para ello se utilizan las técnicas LiDAR, que además han demostrado grandes resultados para evaluar la diversidad y producción de hongos (Moeslund et al., 2019; Peura et al., 2016). Los hongos generalmente fructifican en condiciones cálidas y húmedas (Ágreda et al., 2016), el contenido en agua del suelo es un factor clave para desencadenar la fructificación de estos organismos, se puede inferir de los sensores RADAR (Dorigo et al., 2017; Moran, 2000; Paloscia et al., 2013). Además, la teledetección nos ofrece información sobre el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que es buen estimador de la productividad primaria (Birky, 2001; Rouse et al., 1974; Wang et al., 2004a) cuyas variaciones interanuales se han correlacionado con el crecimiento secundario de los árboles a diferentes escalas espaciales y temporales (Vicente-Serrano et al., 2016). A pesar de la conocida relación positiva entre la productividad primaria forestal y la fructificación de los hongos (Ágreda et al., 2014; Alday et al., 2017; Collado et al., 2019; Herrero et al., 2019). Los datos de teledetección no son independientes del clima, ya que la humedad del suelo responde a la precipitación, la evapotranspiración y las características del suelo (Entekhabi et al., 1996) y el clima es uno de los principales impulsores de la productividad primaria en los ecosistemas terrestres. Por tanto, incorporar sensores remotos a los modelos de cosechas de setas es un primer paso a los modelos de predicción de cosechas de setas detalladas, estos ayudaran al sector turístico micológico y es, además, una oportunidad para explorar el papel ecológico de los impulsores ambientales en la producción de setas.

En este trabajo utilizamos dos de las series temporales más largas de cosechas de setas (22 y 24 años), ambas recogidas en el centro de España (Soria). Utilizamos datos climáticos (precipitaciones y temperaturas) y de los datos obtenidos de la teledetección (NDVI y humedad del suelo) para modelar el rendimiento total de hongos en bosques de pinos húmedos y secos, así como para modelar el rendimiento de las principales especies de interés económico en cada tipo de bosque: *Boletus edulis* Bull. en bosques húmedos y *Lactarius deliciosus* (L.) en bosques secos.

2. Objetivos

El principal objetivo es comprobar si los datos de teledetección permitirán predecir los rendimientos de hongos y cuáles. Para ello planteamos la hipótesis de que (i) la productividad primaria del bosque (estimada por NDVI) tendrá un efecto positivo en las producciones de setas, aunque este rendimiento variará en función del gremio trófico, (ii) la humedad del suelo inferida de

los sensores RADAR igualaran el poder predictivo de los datos de precipitación usados tradicionalmente, y (iii) la combinación de los datos climáticos y de sensores remotos aumentaran el poder predictivo de los modelos para la producción de setas.

3. Metodología

Los datos de hongos utilizados en este trabajo se recolectaron en el centro de España, en la provincia de Soria (región de Castilla y León). La altitud oscila entre 1000 y 1200 metros de altitud y el clima es mediterráneo continental, esto implica, inviernos fríos y un periodo de sequía estival de julio a agosto. Se seleccionaron dos pinares (Figura 1), los pinares dominados por *Pinus pinaster* Ait. y *Pinus sylvestris* L. El bosque de *Pinus pinaster*, bosque seco en adelante crece sobre suelos arenosos con alta permeabilidad y bajo contenido de nutrientes. El bosque húmedo, de *Pinus sylvestris*, crece en ambientes más húmedos, también sobre suelos ácidos, pero con mayor contenido de nutrientes. Se seleccionaron dieciocho parcelas de estudio permanentes en cada bosque, en 1995 para el bosque húmedo y en 1997 para el bosque seco. Estas parcelas son de 150 m² y están valladas para evitar su cosecha y el pisoteo. Semanalmente durante el periodo principal de fructificación (septiembre a diciembre), se recolectan los esporocarpos (cuerpos fructíferos de los hongos), hasta 2018. Estos esporocarpos son pesados en fresco, se identifican a nivel de especie y se clasifican según el gremio de hongos (más detalles en el trabajo de Ágreda et al., 2015). Las parcelas del bosque seco se seleccionaron en función de la estructura del bosque, realizando un diseño de estratificación para poder representar todas las estructuras del bosque, mientras que las parcelas del bosque húmedo se ubicaron en áreas del fondo.

Para cada bosque obtuvimos series temporales de las cosechas de setas anuales. También obtuvimos series temporales anuales de cada uno de los principales gremios tróficos (micorrizas y saprofitas) así como la producción de las principales especies comerciales por zona, *Lactarius deliciosus* para el bosque seco y *Boletus edulis* para el bosque húmedo.

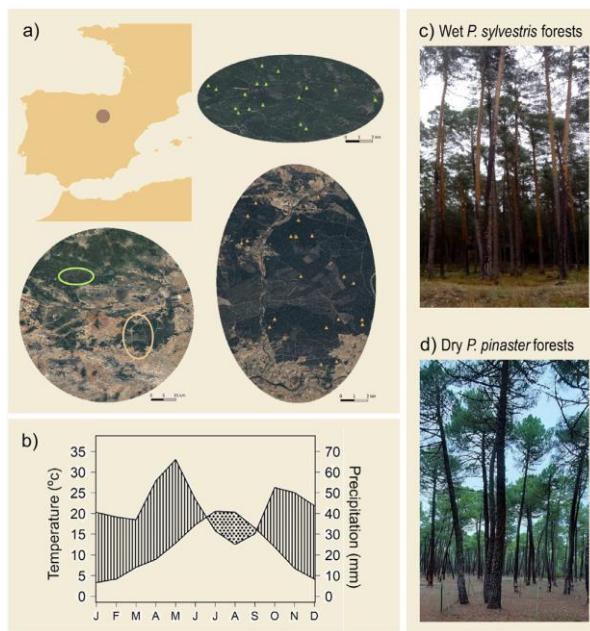


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio y diseño de las parcelas de muestreo (a), climatograma de la ciudad de Soria (b) e imágenes de bosque seco (*Pinus pinaster*) y bosque húmedo (*Pinus sylvestris*) (c, d).

Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica de Soria (41° 46' 30" N, 02° 28' 59" W; 1082 m s. n. m., alrededor de 35 km de los sitios de muestreo, AEMET, Gobierno de España) para el periodo de 1995 a 2018. La temperatura media anual fue de 11,1 °C, siendo eneros

el mes más frío (con una temperatura mínima diaria media de -1,2 °C) y julio el mes más cálido (con una temperatura máxima diaria media de 28,6 °C). la precipitación anual promedio fue de 517 mm, con un período de sequía de verano que ocurre típicamente desde mediados de julio hasta agosto (Figura 1 b).

Los datos de humedad del suelo se obtuvieron del conjunto de datos combinado de humedad del suelo de la ESA CCI con una resolución espacial de 25 km x 25 km (Dorigo et al., 2017; Gruber et al., 2017, 2019). Estos datos se obtienen fusionando conjuntos de datos de humedad del suelo de sensores pasivos y sensores activos(Liu et al., 2012) y estuvieron disponibles desde el 11/1978 hasta 12/2018 a escala mundial. Estos incluyen datos de humedad de suelo basados en el dispersómetro ASCAT (satélites ERS 1/2 y MetOp A/B) y datos de humedad del suelo basados en radiométricos (SMMR, SSM/I, TMI, AMSR-E, WindSat, AMSR2 y SMOS). Para nuestro trabajo, los valores mensuales de humedad del suelo se calcularon como el promedio de los valores diarios disponibles.

Los datos de NDVI se extraen de las misiones de la NASA LS-5, LS7 y LS-8. La resolución espacial para el NDVI es de 30 m, se obtuvieron los valores de NDVI de invierno y verano de todos los años para todas las parcelas del estudio. Elegimos la fecha más próxima al 14 de febrero para invierno y el 15 de agosto para el verano. Dado que las imágenes de los datos seleccionado a veces no estaban disponibles debido a la interferencia de las nubes, buscamos la fecha más próxima con una imagen clara disponible. Hicimos un promedio de los valores del NDVI sobre las 18 parcelas por tipo de bosque, año y estación. Usamos la diferencia entre el NDVI de verano y el NDVI de invierno como una estimación de la productividad primaria anual, ya que consideramos que este es el periodo que explica mejor el comportamiento de los árboles en los climas continentales mediterráneos (Arzac et al., 2018).

Para el análisis estadístico, como primer paso seleccionamos las variables climáticas y de teledetección para incluirlas en la definición de modelos predictivos. Para ello, obtuvimos las correlaciones de Pearson entre las cosechas de setas y los parámetros climáticos mensuales (precipitación y temperatura mínima) de junio a diciembre, según la época de fructificación de los hongos. Para cada parámetro climático, seleccionamos el mes y el periodo acumulado con la correlación más alta para ser incluida en los modelos predictivos. Esto resultó en cuatro parámetros climáticos (dos para la precipitación, dos para la temperatura mínima) por serie de hongos (es decir, cosechas de setas en bosques húmedos, cosechas de setas en bosques secos y producción de las principales especies de interés).

Seguimos el mismo procedimiento para seleccionar parámetros sobre los datos de humedad del suelo. Luego, obtuvimos las correlaciones de Pearson entre las series de datos de setas y los datos del NDVI para el año de fructificación. Dado que la productividad primaria de años anteriores puede tener un efecto positivo retardado en las cosechas de setas a través de la acumulación de materia orgánica, fotoasimilados y otros nutrientes. También se correlacionan las series de las cosechas de setas con datos de NDVI del año anterior y dos años anteriores. De estos tres aplazamientos temporales, seleccionamos el de mayor correlación para incluirlo en los modelos predictivos. Dado que el NDVI y la productividad primaria tienen una relación no lineal, también incluimos un término cuadrático de NDVI en los modelos (Wang et al., 2004b).

Usamos los parámetros para ajustar tres conjuntos diferentes de modelos lineales para cada serie temporal de hongos: (i) Modelos climáticos, utilizando los cuatro parámetros climáticos previamente seleccionados, (ii) Modelos de teledetección, utilizando dos parámetros para la humedad del suelo y el mejor aplazamiento del NDVI y su término cuadrático, y (iii) Modelos combinados, utilizando parámetros climáticos y de teledetección. Los residuos de los modelos completos se analizaron para determinar la normalidad mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk; si los residuos de cualquiera de los tres modelos de una serie no eran normales, la serie temporal se transformó en raíz cuadrada para los tres modelos y que sus resultados fueran comparables. La normalidad de los datos se consiguió después de la transformación. Para conjunto de modelos, comparamos todas las combinaciones aditivas de variables explicativas y se seleccionó el modelo más informativo siguiendo el criterio de información bayesiano (BIC). Se verificaron los factores de

inflación de la varianza (VIF) para los modelos más informativos para buscar multicolinealidad. Dado que los datos de teledetección no estuvieron disponibles durante algunos períodos, la comparación de modelos para la teledetección y modelos combinados se basó en un conjunto de datos reducido que incluía únicamente años con conjuntos de datos completos. Los modelos seleccionados se readjustaron utilizando todos los años disponibles, penalizando así los modelos estimados.

Dado que los hongos pertenecientes a los diferentes gremios tróficos muestran diferentes estrategias de alimentación, evaluamos si los principales gremios fúngicos tróficos mostraban distintas respuestas a la productividad primaria. Para hacer esto, correlacionamos los rendimientos de micorrizas y saprófitos en ambos tipos de bosques con los valores de NDVI en el año de fructificación y con un aplazamiento de uno y dos años.

4. Resultados

Se recolectaron 1325 kg de setas: 519,1 kg en bosques secos (de los cuales 71,4 kg fueron de *Lactarius deliciosus*, 13,8%) y 806,3 kg en bosques húmedos (de los cuales 182,5 kg fueron de *Boletus edulis*, 23,3%). Los hongos micorrílicos dominaron ambas comunidades, y los saprófitos comprendieron alrededor del 10% del peso fresco total. Se obtuvieron 87,3 kg por ha en bosques secos y 124,4 kg por ha en bosques húmedos, pero con un coeficiente de variación del 93,8% para bosques húmedos y un coeficiente de variación del 81,1% para los bosques secos, es decir una alta variabilidad interanual, siendo aun mayor estos coeficientes para las especies individuales. La contribución relativa de estas dos especies a los rendimientos totales también mostró una variabilidad extrema, que va del 0-23% para el *Lactarius deliciosus* y del 0-57% para el *Boletus edulis*.

Los mejores predictores climáticos (Figura 2) para las cosechas de setas en bosques secos fueron la temperatura mínima y precipitaciones del mes de noviembre y la precipitación acumulada del periodo de tiempo de verano a otoño (junio a noviembre), así como la temperatura media de otoño (septiembre a noviembre) son significativos. Los predictores climáticos en los bosques húmedos son la precipitación de verano a otoño (junio a noviembre) y la temperatura mínima media de principios de otoño (septiembre y octubre), siendo septiembre el mes que más destaca. Para el *Lactarius deliciosus* mostraron respuestas marginalmente significativas para los datos de noviembre y las precipitaciones de septiembre a noviembre, mientras que su respuesta a la temperatura mínima fue marginal en septiembre y significativo para el periodo entre septiembre y octubre. Los mejores predictores para el *Boletus edulis* ocurrieron en los mismos meses que en el bosque húmedo, es decir, los datos más significativos son los del mes de septiembre, las precipitaciones de junio a noviembre y las temperaturas mínimas de septiembre a octubre.

La humedad del suelo de verano a otoño estuvo altamente correlacionada con las cosechas de setas, tanto en los bosques húmedos y secos (Figura 2). La mejor correlación mensual ocurrió en octubre para los bosques secos y en septiembre para los bosques húmedos. El *Lactarius deliciosus* compartió su periodo de señal de julio a diciembre con los bosques secos, pero la señal más alta de correlación fue en diciembre. El *Boletus edulis* compartió, también la señal de la humedad del suelo con los bosques húmedos, siendo su mejor mes septiembre.

Tanto los dos tipos de bosques como las especies por individual respondieron positivamente al NDVI en el año anterior (Figura 3a), aunque en los bosques húmedos esta respuesta fue marginal. Los rendimientos de los hongos no se relacionan con el NDVI en el año de fructificación, ni dos años antes, sino que son influenciados por la producción primaria del año anterior.

La producción de hongos micorrícos aumentó con un mayor incremento en el NDVI del año anterior en ambos tipos de bosque, pero no respondió al incremento del NDVI del año actual, dos años antes

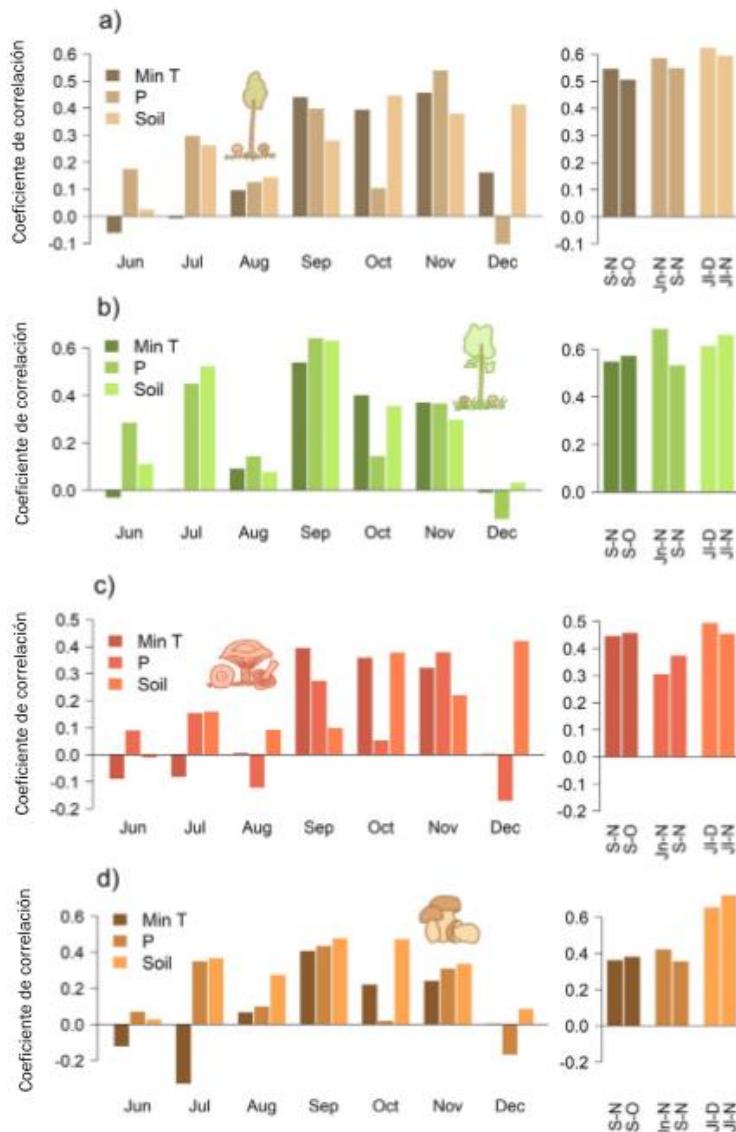


Figura 2. Correlación entre la biomasa anual de setas y la temperatura mínima (Min T), la precipitación (P) y la humedad del suelo (Soil) en períodos mensuales (izquierda) y agregados (derecha) para bosques secos (a) y húmedos (b), así como para el *Lactarius deliciosus* (c) y *Boletus edulis* (d).

(Figura 3b). Los hongos saprófitos mostraron resultados dispares según el tipo de bosque. En los bosques secos, los saprófitos mostraron una fuerte correlación con la productividad primaria de uno y dos años anteriores. En contraste, en los bosques húmedos no existe relación con los incrementos de NDVI para los hongos saprófitos.

Los modelos climáticos para los bosques y especies individuales se transformaron de raíz. La precipitación acumulada de junio a noviembre (Figura 4, Figura 5) fue el único parámetro incluido en el modelo más informativo de los bosques secos. En los bosques húmedos, los rendimientos máximos se produjeron con los períodos húmedos de junio a noviembre y se combinaron con los de septiembre. Para el *Boletus edulis*, solo se incluyó la precipitación de septiembre ya que fue el

parámetro más informativo en el modelo. Mientras que para el *Lactarius deliciosus* se incluyeron las precipitaciones acumuladas de septiembre a noviembre.

Para los modelos de teledetección (Figura 4, Figura 5), la humedad del suelo promedio de junio a diciembre y la variación del NDVI del año anterior explicó una gran parte de las cosechas de setas en los bosques secos. En los bosques húmedos el NDVI del año anterior y la humedad del suelo de septiembre construyeron la mayor información del modelo. Para el *Lactarius deliciosus* los rendimientos respondieron al NDVI del año anterior y a la humedad del suelo de julio a diciembre al

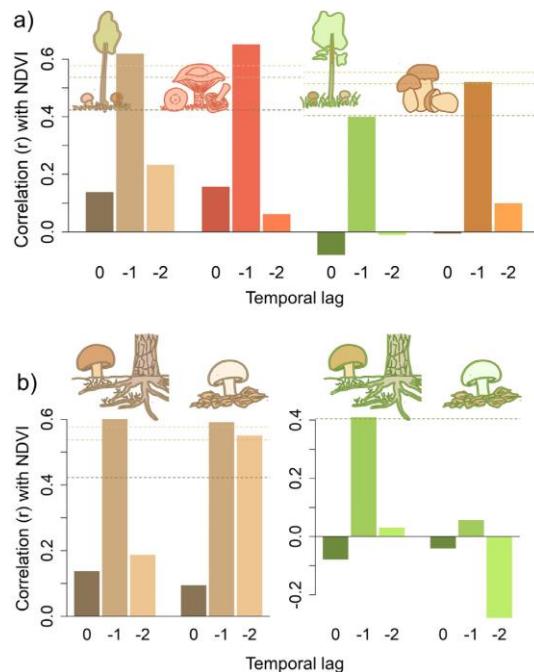


Figura 3. Correlación entre las cosechas de setas y el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) en el año de fructificación (0) y uno y dos años antes (-1 y -2, respectivamente). A) Coeficientes de correlación para cada tipo de bosque y para las dos principales especies comerciales. De izquierda a derecha: bosques secos, *Lactarius deliciosus*, bosques húmedos y *Boletus edulis*. B) Coeficientes de correlación en función de los gremios tróficos (micorrízicos y saprófitos, respectivamente) en bosques secos y bosques húmedos.

igual que en los bosques secos, mientras que el *Boletus edulis* los rendimientos fueron máximos cuando hay alta humedad del suelo de julio a noviembre después de un NDVI anual alto.

En los modelos combinados los rendimientos de las cosechas de setas en los bosques secos (Figura 4, Figura 5) aumentó cuando las condiciones de lluvia de junio a noviembre ocurrieron después de un año con alta variación de NDVI. Las condiciones son similares para los bosques húmedos, con un efecto positivo de NDVI, las precipitaciones de junio a noviembre y las temperaturas mínimas de septiembre a octubre. El efecto del incremento de NDVI en el año anterior fue significativo para el *Lactarius deliciosus* y el *Boletus edulis*. El modelo más informativo para el *Lactarius deliciosus* incluyó la precipitación acumulada de septiembre a octubre y el NDVI, mientras que para el *Boletus edulis* incluyó el NDVI, así como los efectos de alta humedad del suelo de julio a septiembre en todos los casos, lo que indica es que no hay multicolinealidad.

Los modelos combinados incluyeron más parámetros y explicaron una mayor proporción de varianza que los modelos climáticos y de teledetección por si solos (Figura 4). A nivel mundial, los modelos combinados proporcionaron el mejor ajuste a los datos, seguido de los modelos de teledetección. Los modelos climáticos proporcionaron el peor ajuste con la única excepción la de los bosques húmedos, para los cuales el modelo climático tenía un mejor ajuste.

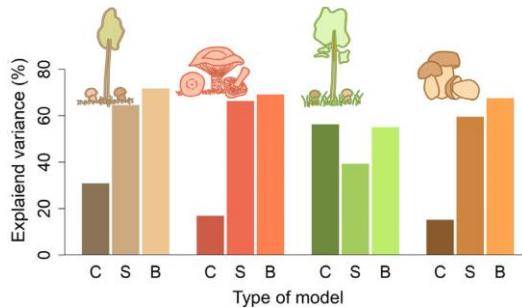


Figura 4. Porcentaje de la varianza ajustada explicada por los modelos climáticos (C), de teledetección (S) y combinados (B). De izquierda a derecha, resultados en los bosques secos, producción de *Lactarius deliciosus*, bosques húmedos y producción de *Boletus edulis*.

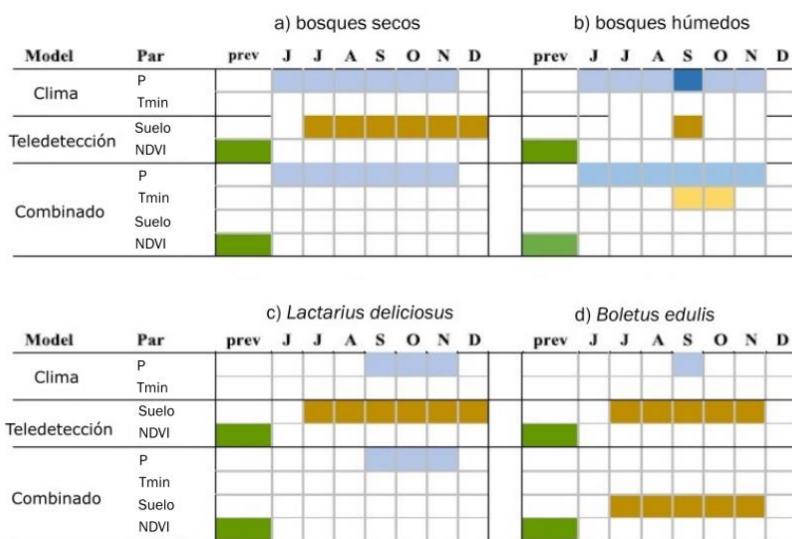


Figura 5. Parámetros incluidos en los modelos más informativos que explican las cosechas de setas en (a) bosques secos y (B) bosques húmedos, así como para (c) *Lactarius deliciosus* y (d) *Boletus edulis*. Los parámetros climáticos incluyen precipitación (P) y temperatura mínima (Tmin). Los parámetros de teledetección incluyen la humedad del suelo (suelo) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), obtenido como la diferencia del NDVI del verano menos la del invierno del año anterior. Las celdas coloreadas indican la variable predictora (filas) que se incluyó para ese mes (columnas) o período en el modelo más informativo. El azul oscuro en septiembre en los bosques húmedos indica el efecto aditivo de la precipitación de septiembre y la precipitación acumulada de junio a noviembre. Todos los factores tuvieron efectos positivos sobre el rendimiento de hongos.

5. Discusión

Según nuestra primera hipótesis, la productividad primaria del año anterior (inferida del NDVI) tuvo una correlación positiva en el rendimiento fúngico. Al explorar esta señal, encontramos diferencias entre los diferentes tipos de bosques: la señal fue similar para los hongos micorrílicos en los bosques secos y húmedos, pero difería para el gremio de los hongos saprófitos. El efecto fue fuerte en los retrasos de uno y dos años en los bosques secos, pero desaparecieron en los bosques húmedos que son más productivos. Los datos también respaldaron nuestra segunda hipótesis, ya que la humedad del suelo inferida de los sensores RADAR rivalizaba con el poder predictivo de los datos de precipitación. Finalmente, los modelos que incluyen datos climáticos y de teledetección mejoraron los modelos basados únicamente en datos climáticos, confirmando así nuestra tercera hipótesis.

Los datos de humedad del suelo basados en sensores remotos proporcionaron resultados similares a los de la precipitación para predecir la producción de setas. Los valores de humedad del suelo pueden atribuirse parcialmente a la lluvia, pero otros parámetros como la temperatura, la insolación y otras variables del suelo también tienen una cierta influencia en las variaciones diarias y estacionales de la humedad del suelo (Robock, 2015). De hecho, las predicciones a largo plazo para la producción de setas difieren cuando la evapotranspiración, en lugar de la precipitación, se incluye en los modelos (Collado et al., 2019). Por lo tanto, considerar los valores de humedad del suelo en lugar de los parámetros climáticos en los modelos predictivos evita esta limitación. Además, la humedad del suelo a lo largo de la temporada de fructificación se relacionó con la producción de setas de una manera más estable que la precipitación, lo que sugiere que el proceso biológico se reflejó de una manera más realista.

Considerar el poder predictivo del NDVI como un sustituto de la productividad primaria forestal también mostró resultados prometedores. El crecimiento de los micelios de los hongos forestales es apoyado por los árboles, ya sea directamente, mediante la transferencia de fotoasimilados (hongos micorrízicos) o indirectamente, a través del efecto de una mayor producción de biomasa sobre la disponibilidad de sustrato para los descomponedores (hongos saprófitos). Diferentes estudios han intentado vincular series temporales de crecimiento de árboles con producción de hongos (Collado et al., 2019; Primicia et al., 2016) debido a la relación existente entre el crecimiento de los árboles y los niveles de fotoasimilación (von Arx et al., 2017). El crecimiento de los árboles ha demostrado resultados prometedores en los pinos mediterráneos, pero esta relación podría responder al control climático común sobre el crecimiento de los árboles y la producción de setas (Ágreda et al., 2015; Arzac et al., 2018). En este sentido, los datos de NDVI de teledetección tienen el potencial de vincular la productividad primaria con el crecimiento de setas, ya que el NDVI es una estimación más robusta de la productividad primaria que el ancho del anillo (Schloss et al., 1999). Pero, además, la correlación constante que encontramos entre el NDVI del año anterior y las cosechas de setas en todos los modelos que combinaban la teledetección con datos climáticos sugirió una clara separación en el dominio del tiempo entre la productividad primaria y la producción de hongos, reduciendo así los efectos de confusión potenciales debido a un forzamiento climático común (Collado et al., 2019).

Nuestro estudio sugiere que la acumulación de recursos de los árboles en un año determinado podría promover la producción de setas en la próxima temporada de fructificación. Dado que los diferentes gremios de hongos utilizan diferentes recursos, se esperaban respuestas contrastantes entre los hongos saprófitos y micorrízicos y, de hecho, encontramos cierto apoyo para esta expectativa. Los hongos micorrízicos se correlacionaron con la producción primaria en el año anterior. Dado que la biomasa de hongos micorrízicos depende de la transferencia de carbono por parte del huésped (Allen, 1991), esta correlación entre el NDVI del año anterior podría atribuirse a un beneficio directo de una mayor disponibilidad de recursos arbóreos. El efecto sobre hongos saprófitos, por el contrario, fue indirecto y dependió de la productividad del sitio. Los hongos saprófitos en los bosques secos menos productivos mostraron fuertes respuestas positivas a la productividad primaria con atrasos de uno y dos años. En este bosque manejado con la baja disponibilidad de madera muerta, la hojarasca proporciona el sustrato principal para los hongos saprófitos. Se ha demostrado que una mayor productividad primaria tiene un efecto directo sobre la caída de la hojarasca (Schlesinger, 1997; Wang et al., 2004b), aunque con cierto retraso para las especies perennes. Por lo tanto, en nuestro bosque de pinos, se podría esperar un efecto atrasado de uno a dos años de la productividad primaria sobre la caída de la hojarasca, lo que plantea una explicación plausible de la correlación rezagada entre el NDVI y el desarrollo de hongos saprófitos. En contraste, la fracción saprofítica de los bosques húmedos más productivos no respondió a la productividad primaria a ninguna escala temporal, probablemente debido a la existencia de una mayor acumulación de biomasa, pero también a la topografía de las parcelas de muestreo, que estaban ubicadas en zonas de fondo, siendo subvencionadas con materia orgánica de los alrededores. Con abundante materia orgánica, el control de la producción de hongos solo dependería de las condiciones climáticas a escala anual.

Con base a estos resultados, proponemos como hipótesis de trabajo que la producción de hongos puede responder a un proceso de dos pasos: la acumulación de recursos durante el año

anterior determinaría la energía disponible para sustentar el crecimiento micelial, actuando como factor predisponente, considerando que las condiciones climáticas durante la temporada de fructificación regularían la capacidad de los micelios para transformar esta energía en cuerpos fructíferos, actuando como un factor desencadenante (Figura 6). Esta hipótesis podría ayudar a comprender como el medio ambiente controla la producción de hongos, pero somos conscientes de que nuestros resultados solo sugieren una evidencia limitada que la respalde. Por lo tanto, estudios futuros deberían probar y validar (o falsificar) esta hipótesis con trabajo experimental en bosques con diferente productividad y comunidades de hongos.

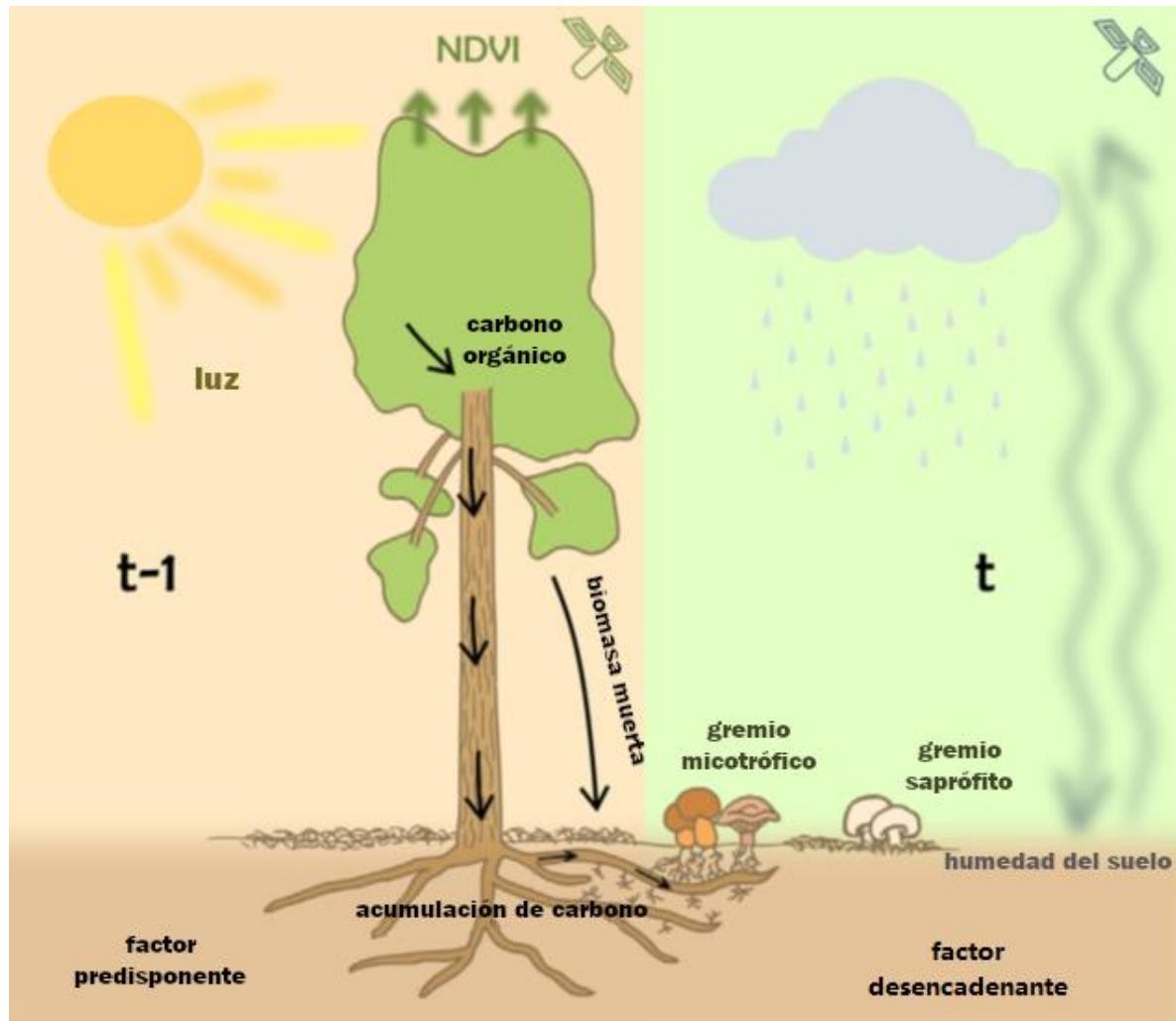


Figura 6. Esquema de la hipótesis derivada de este trabajo para determinar los factores ambientales que controlan la producción de setas. La productividad primaria (NDVI) en un año determinado ($t-1$) controla la ganancia de carbono, lo que conduce a su acumulación en las raíces. Una mayor acumulación de carbono favorecería el desarrollo de hongos micorrízicos, aumentando la producción de setas de las especies de hongos micorrízicos el año siguiente (t) y actuando, así como un factor predisponente. En el caso de los hongos saprófitos, la acumulación de biomasa muerta bajo las copas de los árboles también favorecería la producción de setas en el año siguiente o incluso dos años después. En cualquier caso, la producción final de setas dependería de la existencia de condiciones climáticas favorables (humedad, temperatura...) durante la temporada de fructificación (factor desencadenante).

6. Conclusiones

La combinación de datos de sensores remotos con los datos climáticos mejoró la capacidad de modelar la producción de setas en los dos bosques de pinos mediterráneos con niveles de humedad diferentes. Nuestro conjunto de datos de humedad del suelo se basó en datos de baja resolución

espacial, pero los nuevos productos de teledetección para la humedad del suelo y permiten la estimación de la humedad del suelo a una mejor resolución espacial y temporal (ESA - Copernicus, 2014). Además, los valores de temperatura diaria de alta resolución espacial también están disponibles con métodos de teledetección de manera diaria (Wang et al., 2004a), y los datos de teledetección sobre la productividad primaria se encuentran en una etapa muy madura, con múltiples datos satelitales disponibles fácil y gratuitamente. En conjunto, nuestros resultados abren un camino para utilizar datos de teledetección con alta resolución espaciotemporal para enfrentar el desafío de predecir las cosechas de setas intraestacionales en el espacio y el tiempo.

7. Agradecimientos

Agradecemos a la consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León la financiación de las parcelas permanentes y el acceso a las series temporales de las cosechas de setas, así como al Centro forestal de Valonsadero, Fundación Cesefor y a todas las personas implicadas en el seguimiento de las parcelas.

8. Bibliografía

AUTOR (APELLIDO, N.); Año. Título del libro. Editorial. Páginas. Ciudad

AUTOR (APELLIDO, N.); AUTOR (APELLIDO, N.); AUTOR (APELLIDO, N.); Año. Título del capítulo. En: APELLIDO, N.; APELLIDO, N. (eds.): Título del libro. Página Ini-Fin. Editorial. Ciudad.

ÁGREDA, T., ÁGUEDA, B., FERNÁNDEZ-TOIRÁN, M., VICENTE-SERRANO, S. M., OLANO, J. M. (2016). Long-term monitoring reveals a highly structured interspecific variability in climatic control of sporocarp production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.015>

ÁGREDA, T., ÁGUEDA, B., OLANO, J. M., VICENTE-SERRANO, S. M., y FERNÁNDEZ-TOIRÁN, M. (2015). Increased evapotranspiration demand in a Mediterranean climate might cause a decline in fungal yields under global warming. *Global Change Biology*, 21(9). <https://doi.org/10.1111/gcb.12960>

ÁGREDA, T., CISNEROS, O., ÁGUEDA, B., y FERNÁNDEZ-TOIRÁN, L. M. (2014). Age class influence on the yield of edible fungi in a managed Mediterranean forest. *Mycorrhiza*. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0522-y>

ALDAY, J. G., MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J., DE-MIGUEL, S., y BONET, J. A. (2017). Mushroom biomass and diversity are driven by different spatio-Temporal scales along Mediterranean elevation gradients. *Scientific Reports*, 7(October 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep45824>

Allen, M. (1991). *The Ecology of Mycorrhizae*. Cambridge University Press.

ARZAC, A., BABUSHKINA, E. A., FONTI, P., SLOBODCHIKOVA, V., SVIDERSKAYA, I. V., y VAGANOV, E. A. (2018). Evidences of wider latewood in *Pinus sylvestris* from a forest-steppe of Southern Siberia. *Dendrochronologia*, 49, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.02.007>

BARRETT, F., MCROBERTS, R. E., TOMPOPO, E., CIENCIALA, E., y WASER, L. T. (2016). A questionnaire-based review of the operational use of remotely sensed data by national forest inventories. In *Remote*

Sensing of Environment (Vol. 174, pp. 279–289). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.029>

BIRKY, A. K. (2001). NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics. In *Ecological Modelling* (Vol. 143). www.elsevier.com/locate/ecolmodel

BOA, E. (2005). Los hongos silvestres comestibles. In *FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*.

COLLADO, E., BONET, J. A., CAMARERO, J. J., EGLI, S., PETER, M., SALO, K., MARTÍNEZ-PEÑA, F., OHENOJA, E., MARTÍN-PINTO, P., PRIMICIA, I., BÜNTGEN, U., KURTTILA, M., ORIA-DE-RUEDA, J. A., MARTÍNEZ-DE-ARAGÓN, J., MIINA, J., y DE-MIGUEL, S. (2019). Mushroom productivity trends in relation to tree growth and climate across different European forest biomes. *Science of the Total Environment*, 689, 602–615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.471>

DORIGO, W., WAGNER, W., ALBERGEL, C., ALBRECHT, F., BALSAMO, G., BROCCA, L., CHUNG, D., ERTL, M., FORKEL, M., GRUBER, A., HAAS, E., HAMER, P., HIRSCHI, M., IKONEN, J., DE JEU, R., KIDD, R., y LAHOZ, W. (2017a). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: state-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, Submitted, July. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>

ENTEKHABI, D., RODRIGUEZ-ITURBE, I., y CASTELLI, F. (1996). Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes. In *Journal of Hydrology ELSEVIER Journal of Hydrology* (Vol. 184).

ESA - COPERNICUS. (2014). *Copernicus* Open Acess Hub.
<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

FERNÁNDEZ-TOIRÁN, L. M., ÁGREDA, T., y OLANO, J. M. (2006). Stand age and sampling year effect on the fungal fruit body community in *Pinus pinaster* forests in central Spain. *Canadian Journal of Botany*, 84(8), 1249–1258. <https://doi.org/10.1139/b06-087>

GRUBER, A., DORIGO, W. A., CROW, W., y WAGNER, W. (2017). Triple Collocation-Based Merging of Satellite Soil Moisture Retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12), 6780–6792. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2734070>

GRUBER, A., SCANLON, T., VAN DER SCHALIE, R., WAGNER, W., y DORIGO, W. (2019). Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. *Earth System Science Data*, 11(2), 717–739. <https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019>

HERRERO, C., BERRAONDO, I., BRAVO, F., PANDO, V., ORDÓÑEZ, C., OLAIZOLA, J., MARTÍN-PINTO, P., y DE RUEDA, J. A. O. (2019). Predicting mushroom productivity from long-term field-data series in mediterranean *Pinus pinaster* ait. forests in the context of climate change. *Forests*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/f10030206>

KÜÇÜKER, D. M., y BAŞKENT, E. Z. (2017). Sustaining the joint production of timber and *Lactarius* mushroom: A case study of a forest management planning unit in Northwestern Turkey. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su9010092>

LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., PARKER, G. G., y HARDING, D. J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *Sciences-New York*, 52(1), 19–30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052)

LIU, Y. Y., DORIGO, W. A., PARINUSSA, R. M., DE JEU, R. A. M., WAGNER, W., MCCABE, M. F., EVANS, J. P., y VAN DIJK, A. I. J. M. (2012). Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 123, 280–297. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.014>

MARTÍNEZ-PEÑA, F., DE-MIGUEL, S., PUKKALA, T., BONET, J. A., ORTEGA-MARTÍNEZ, P., ALDEA, J., y MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J. (2012). Yield models for ectomycorrhizal mushrooms in *Pinus sylvestris* forests with special focus on *Boletus edulis* and *Lactarius* group *deliciosus*. *Forest Ecology and Management*, 282, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.034>

MOESLUND, J. E., ZLINSKY, A., EJRNÆS, R., BRUNBJERG, A. K., BØCHER, P. K., SVENNING, J. C., y NORMAND, S. (2019). Light detection and ranging explains diversity of plants, fungi, lichens, and bryophytes across multiple habitats and large geographic extent. *Ecological Applications*, 29(5). <https://doi.org/10.1002/eap.1907>

MORAN, S. (2000). Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semiarid rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105(1–3), 69–80. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00189-1)

PALOSCIA, S., PETTINATO, S., SANTI, E., NOTARNICOLA, C., PASOLLI, L., y REPPUCCI, A. (2013). Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation. *Remote Sensing of Environment*, 134, 234–248. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.027>

PEURA, M., SILVEYRA GONZALEZ, R., MÜLLER, J., HEURICH, M., VIERLING, L. A., MÖNKKÖNEN, M., y BÄSSLER, C. (2016). Mapping a ‘cryptic kingdom’: Performance of lidar derived environmental variables in modelling the occurrence of forest fungi. *Remote Sensing of Environment*, 186, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.003>

PRIMICIA, I., CAMARERO, J. J., MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J., DE-MIGUEL, S., y BONET, J. A. (2016). Linkages between climate, seasonal wood formation and mycorrhizal mushroom yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229, 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.013>

ROBOCK, A. (2015). HYDROLOGY, FLOODS AND DROUGHTS | Soil Moisture. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition*, 232–239. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00169-9>

ROUSE, J. W. , JR., HAAS, R. H., DEERING, D. W., SCHELL, J. A., y HARLAN, J. C. (1974). Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. [Great Plains Corridor]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19750020419>

SATO, H., MORIMOTO, S., y HATTORI, T. (2012). A Thirty-Year Survey Reveals That Ecosystem Function of Fungi Predicts Phenology of Mushroom Fruiting. *PLoS ONE*, 7(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049777>

SCHLESINGER, W. H. (1997). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* (Second ed.). Academic press.

SCHLOSS, A. L., KICKLIGHTER, D. W., KADUK, J., WITTENBERG, U., y INTERCOMPARISON, THE. P. O. F. THE. P. NPP. M. (1999). Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): comparison of NPP to climate and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). *Global Change Biology*, 5(S1), 25–34. [https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00004.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00004.x)

TOMAO, A., BONET, J. A., MARTÍNEZ DE ARAGÓN, J., y DE-MIGUEL, S. (2017). Is silviculture able to enhance wild forest mushroom resources? Current knowledge and future perspectives. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 402, pp. 102–114). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.039>

VICENTE-SERRANO, S. M., CAMARERO, J. J., OLANO, J. M., MARTÍN-HERNÁNDEZ, N., PEÑA-GALLARDO, M., TOMÁS-BURGUERA, M., GAZOL, A., AZORIN-MOLINA, C., BHUYAN, U., y EL KENAWY, A. (2016). Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.001>

VON ARX, G., ARZAC, A., FONTI, P., FRANK, D., ZWEIFEL, R., RIGLING, A., GALIANO, L., GESSLER, A., y OLANO, J. M. (2017). Responses of sapwood ray parenchyma and non-structural carbohydrates of *Pinus sylvestris* to drought and long-term irrigation. *Functional Ecology*, 31(7), 1371–1382. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12860>

WANG, J., RICH, P. M., PRICE, K. P., y KETTLE, W. D. (2004a). Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 25(16), 3127–3138. <https://doi.org/10.1080/0143116032000160499>

WANG, Q., TENHUNEN, J., DINH, N. Q., REICHSTEIN, M., VESALA, T., y KERONEN, P. (2004b). Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of a Scots pine forest in Finland. *Remote Sensing of Environment*, 93(1–2), 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.006>