

ESTUDIO DE LAS PROYECCIONES DE FUTURO EN SEQUÍA E INCENDIOS EN LA ZONA MEDITERRÁNEA

Juan José ROSA CÁNOVAS¹, Marco TURCO², Sonia JEREZ RODRÍGUEZ¹, Juan Pedro MONTÁVEZ GÓMEZ¹

¹*Grupo de Modelización Atmosférica Regional. Departamento de Física, Universidad de Murcia.*

²*Departamento de Física Aplicada, Universidad de Barcelona.*

juanjose.rosa@um.es, turco.mrc@gmail.com, sonia.jerez@gmail.com, montavez@um.es

RESUMEN

El objetivo principal del trabajo ha consistido en la realización de proyecciones de futuro para la sequía y el área quemada (BA, Burned Area) por los incendios en verano sobre las regiones de la Europa mediterránea. Para la evaluación de la intensidad de la sequía se ha empleado el índice SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), calculado a partir de datos de precipitación y de evapotranspiración potencial que se han obtenido de un modelo regional (MM5) alimentado por varios modelos globales. La BA se ha calculado utilizando un modelo empírico de regresión lineal que tiene al SPEI como variable. Las proyecciones de futuro han sido realizadas sobre tres de los escenarios de emisiones empleados en el cuarto informe del IPCC, el A2, el A1B y el B1, para las diferentes configuraciones del MM5 y han consistido en el cálculo de la diferencia de promedios temporales del SPEI y de la BA entre un período futuro, 2021-2050, y otro de referencia, 1971-2000. Los resultados indican que las regiones más afectadas por la sequía y los incendios podrían ser las de Portugal, las de la costa de Italia y las de Grecia. En este último caso, el índice SPEI en agosto experimenta descensos (incremento de la sequía) de entre -0.75 y -0.5 z (unidades estandarizadas). Los mayores incrementos netos en la BA tienen lugar en Portugal: entre 10 y 15 kha (miles de hectáreas). En Grecia se proyecta el mayor aumento relativo en la BA en el intervalo [100, 150] %.

Palabras clave: Sequía, Área quemada, Proyecciones de futuro, Escenarios de emisiones, Europa mediterránea.

ABSTRACT

The main aim of this study was to carry out projections of future drought and burned area (BA) by fires in summer over Mediterranean Europe. To evaluate drought intensity, we have used the SPEI (Standardized Precipitation Index), computed with precipitation and potential evapotranspiration data which have been obtained from a regional model (MM5) driven by several global models. We have calculated BA using an empirical linear regression model which has SPEI as predictor variable. Future projections have been made over three of the emission scenarios employed in the fourth IPCC assessment report, A2, A1B and B1 scenarios, for several MM5

configurations and have consisted in calculating the difference of SPEI and BA time averages between a future period, 2021-2050, and another reference one, 1971-2000. The results show that the most affected regions by drought and fires could be placed in Portugal, the Italian coast and Greece. In the latter case, SPEI shows a decrease in August (increase of drought intensity) between $-0.75 z$ and $-0.5 z$ (standardized units). The largest net increases in BA has taken place in Portugal: between 10 and 15 kha (thousands of hectares). In Greece, the largest relative increase in BA is projected in the [100, 150] % interval.

Key words: Drought, Burned Area, Future projections, Emissions scenarios, Mediterranean Europe.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es una de las principales causas naturales de los daños observados en agricultura, economía y medio ambiente (IPCC, 2012). La necesidad de una definición precisa de la sequía para una situación específica ha constituido un obstáculo para su control y análisis. Las diferentes descripciones (meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas) demuestran el interés multidisciplinar en este tipo de eventos (Wilhite y Glantz, 1985). Todos los enfoques están de acuerdo en que la sequía es una condición de humedad insuficiente causada por un déficit de precipitación durante un determinado período de tiempo (McKee et al., 1993).

Para conocer la severidad de los eventos de sequía se utilizan generalmente los llamados índices de sequía: unos valores numéricos relacionados con algunos de los efectos acumulados de un déficit de humedad prolongado y anormal. Los indicadores o variables que se suelen emplear en la descripción de estos eventos son la precipitación, la temperatura, el caudal de arroyos/ríos, el agua subterránea y los niveles de reserva, la humedad del suelo y la nieve acumulada (WMO y GWD, 2016). Algunos de los índices más utilizados pueden ser consultados en la reseña de Zargar et al. (2011). Vicente-Serrano et al. (2010) desarrollaron el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), un índice calculado con datos de precipitación y temperatura, entre otras variables. El SPEI, frente a otros índices de sequía, presenta la ventaja de combinar un carácter temporal multiescalar con la capacidad de incluir los efectos de la temperatura (y otras variables) en la evaluación de la sequía. Está especialmente diseñado para detectar y analizar las consecuencias del calentamiento global en las condiciones de sequía.

Los incendios son procesos asociados a factores climáticos, a la actividad humana y a la cubierta vegetal que actúa como combustible (Bowman et al., 2009). La mayor parte del área quemada por los incendios en Europa está concentrada en las regiones del Mediterráneo. Esto conlleva severos daños económicos y medioambientales, que incluyen pérdidas materiales, vidas humanas y una media aproximada de 450 kha (miles de hectáreas) de área quemada cada año (San-Miguel-Ayanz y Camia, 2010). La relación entre los incendios y el clima es compleja y viene mediada por la hipótesis incendio-productividad (Pausas y Ribeiro, 2013). En las regiones más productivas y húmedas, el combustible es abundante y el desarrollo de los incendios se ve limitado por su contenido en humedad. Un aumento en la frecuencia de las sequías favorecería

la aparición de incendios. Por otro lado, en las regiones menos productivas y más áridas, los regímenes de incendios son más sensibles a la variación del combustible que a su contenido en agua, actuando el primero como factor limitante.

Las regiones del Mediterráneo son consideradas como ecosistemas intermedios, donde tanto el combustible como el clima cumplen papeles importantes (Meyn et al., 2007; Turco et al., 2013). Turco, Von Hardenberg, et al. (2017) encontraron para la zona mediterránea una correlación entre la intensidad de la sequía y el área de la superficie quemada (BA, Burned Area) por los incendios durante el verano, época en la que la actividad es mayor que en cualquier otro momento del año. Ese estudio corrobora la experiencia observada de que veranos más cálidos y secos conducen a incendios mayores. Las predicciones de cambio climático apuntan a un aumento del riesgo de incendio en el futuro (Turco et al., 2014), aunque los efectos de la variación del clima en la BA no son siempre tan obvios (Turco, Levin, et al., 2017). Por ejemplo, el incremento de las condiciones de sequía podría reducir la BA limitando el combustible disponible tal y como sostiene la hipótesis ya comentada.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Cálculo del índice de sequía SPEI

El SPEI es una función de la diferencia entre la precipitación (PR) y la evapotranspiración potencial (PET, Potential Evapotranspiration) (Vicente-Serrano et al., 2010). De entre todos los métodos disponibles para el cálculo de la PET, en este trabajo se ha empleado la aproximación de FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998). La diferencia PR-PET representa un balance climático de agua que aporta diferente información en función de la escala de meses de acumulación empleada (Vicente-Serrano et al., 2010). En una escala de acumulación de s meses, el índice SPEI calculado para el mes m utiliza datos del balance acumulado en los meses $m-s+1$, $m-s+2$, ..., $m-1$ y m . Por ejemplo, el SPEI del mes de agosto ($m=8$) en una escala de acumulación de 3 meses ($s=3$) utiliza datos del balance acumulado en los meses de junio, julio y agosto. Para calcular el SPEI a partir de este balance se ha empleado el método utilizado en Hao et al. (2014). Las series temporales del SPEI están estandarizadas: presentan media nula y desviación estándar unidad. Los valores positivos del índice indican condiciones húmedas, mientras que los negativos están asociados a condiciones secas.

Los datos de PR y PET utilizados proceden del modelo regional MM5, uno de los cuatro modelos regionales integrantes del proyecto ESCENA (Jiménez-Guerrero et al., 2013). Este modelo es una versión climática del Fifth-Generation Pennsylvania State University-NCAR Mesoscale Model que ha sido implementada en la Universidad de Murcia y que posee una resolución de 25 kilómetros. Ha sido alimentado por cuatro modelos globales, ARPEGE, ECHAM, HadCM3Q3 y HadCM3Q16, considerando algunos de los escenarios de emisiones empleados en el cuarto informe del IPCC: el A2, el A1B y el B1 (IPCC, 2000).

2.2. Cálculo del área quemada BA

Para estimar la BA en verano (junio, julio, agosto y septiembre) se ha empleado un modelo empírico de regresión lineal múltiple que tiene al SPEI y a la tendencia temporal de los factores climáticos y antrópicos como predictores. Este modelo SPEI-BA constituye una modificación del desarrollado por Turco, Von Hardenberg, et al. (2017). La calibración se lleva a cabo ajustando la ecuación

$$\log[BA(i, t)] = a(i) \cdot CD(i, t) + b(i) \cdot AD(i, t) + c(i) \cdot t + n(i) + \varepsilon(i, t)$$

donde $BA(i, t)$ es el área quemada observada en hectáreas (ha) en la región i -ésima durante el verano del año t ; $a(i)$ y $b(i)$ son coeficientes que varían espacialmente y que representan la sensibilidad en cada región de la BA a las sequías observadas coincidente (CD, Coincident Drought) y antecedente (AD, Antecedent Drought) al año t , respectivamente; el coeficiente $c(i)$ está asociado a las tendencias temporales de los factores climáticos y antrópicos (ver p. ej. Turco et al., 2014, 2016); $n(i)$ es la ordenada en el origen de la regresión; y $\varepsilon(i, t)$ es el término de error estocástico que engloba a todos los demás factores que influyen en la BA despreciados por el modelo. Las condiciones de sequía CD y AD se expresan mediante el índice SPEI observado en diferentes escalas de acumulación: $SPEI_s(\tau, m)$, donde s es la escala temporal de acumulación de 3, 6 o 12 meses, τ es el retraso temporal en años respecto al momento en el que se calcula la BA (igual a 0 si la sequía es coincidente, a 1 si corresponde al año anterior, etc.) y m es el mes para el que se calcula el índice. En la calibración del modelo se han empleado datos mensuales de BA (mayores a 1 ha) de la base de datos del EFFIS (San-Miguel-Ayán et al., 2012) en el nivel NUTS3 (versión 2006, ver <http://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/> para más detalles) para Portugal, España, el sur de Francia, Italia y Grecia durante el período 1985-2011. Por otro lado, el SPEI mensual utilizado para calibrar está calculado con datos de PR y PET (aproximación de FAO-56 Penman-Monteith) de la Climatic Research Unit of the University of East Anglia (CRU versión 3.22). Este SPEI (v2.3) ha sido obtenido de <http://sac.csic.es/spei/database.html>.

Para estimar la BA se han aplicado los SPEI obtenidos mediante el modelo MM5 al modelo SPEI-BA calibrado:

$$\log[BA(i, t)]|_{mod} = a(i) \cdot CD(i, t)|_{mod} + b(i) \cdot AD(i, t)|_{mod} + n(i)$$

donde el subíndice *mod* hace referencia a que esas variables ya no son observadas, sino modeladas. Se ha eliminado el término $c(i) \cdot t$ porque no se consideran las tendencias temporales del pasado, sino únicamente la respuesta de la BA a la evolución modelada del SPEI.

Los datos son agrupados espacialmente considerando las eco-regiones definidas en Turco, Von Hardenberg, et al. (2017). Como del MM5 resultan datos del SPEI en rejilla, para obtener el valor del índice en cada eco-región ha sido necesario realizar promedios espaciales considerando los puntos que caen en cada una de ellas. La división del territorio tiene en cuenta la estratificación climática del medio ambiente de Europa llevada a cabo por Metzger et al. (2005). Se mantienen las divisiones entre países con el objetivo de facilitar los resultados de este tipo de estudios a las

autoridades políticas y forestales (Turco, Von Hardenberg, et al., 2017). En la tabla 1 se muestran las relaciones SPEI-BA para cada eco-región.

ID Región	Modelo
ES01	$\log[BA] = -0.80 \cdot SPEI_3(0,8) + 0.86 \cdot SPEI_{12}(3,11) + 10.21$
ES02	$\log[BA] = -1.07 \cdot SPEI_3(0,8) + 0.81 \cdot SPEI_{12}(2,8) + 6.28$
ES03	$\log[BA] = -0.57 \cdot SPEI_3(0,8) + 9.59$
ES04	$\log[BA] = -1.00 \cdot SPEI_3(0,8) + 7.41$
ES05	$\log[BA] = -0.56 \cdot SPEI_3(0,8) + 9.68$
ES07	$\log[BA] = -1.31 \cdot SPEI_3(0,7) + 7.94$
ES08	$\log[BA] = -0.61 \cdot SPEI_3(0,7) + 9.86$
ES10	$\log[BA] = -0.54 \cdot SPEI_6(0,9) + 9.59$
ES11	$\log[BA] = -1.03 \cdot SPEI_3(0,8) + 8.22$
ES13	$\log[BA] = -0.79 \cdot SPEI_3(0,7) + 8.81$
ES14	$\log[BA] = -1.23 \cdot SPEI_3(0,7) + 8.21$
ES15	$\log[BA] = -0.83 \cdot SPEI_3(0,7) + 7.13$
ES17	$\log[BA] = -1.04 \cdot SPEI_3(0,8) + 6.47$
FR01	$\log[BA] = -0.73 \cdot SPEI_3(0,8) + 7.69$
FR03	$\log[BA] = -1.55 \cdot SPEI_6(0,8) + 7.77$
FR04	$\log[BA] = -0.93 \cdot SPEI_3(0,7) + 8.86$
GR01	$\log[BA] = -1.03 \cdot SPEI_3(0,9) + 9.03$
GR02	$\log[BA] = -0.71 \cdot SPEI_3(0,9) + 8.71$
GR03	$\log[BA] = -0.99 \cdot SPEI_{12}(0,9) + 8.93$
IT03	$\log[BA] = -0.37 \cdot SPEI_3(0,8) + 5.51$
IT04	$\log[BA] = -0.36 \cdot SPEI_3(0,8) + 9.06$
IT05	$\log[BA] = -0.71 \cdot SPEI_3(0,8) + 7.98$
IT06	$\log[BA] = -0.66 \cdot SPEI_3(0,8) + 8.83$
IT07	$\log[BA] = -0.77 \cdot SPEI_3(0,8) + 0.37 \cdot SPEI_3(3,12) + 8.84$
IT08	$\log[BA] = -1.23 \cdot SPEI_3(0,8) + 6.43$
IT09	$\log[BA] = -1.12 \cdot SPEI_3(0,8) + 6.18$
IT10	$\log[BA] = -0.95 \cdot SPEI_3(0,8) + 7.06$
IT11	$\log[BA] = -0.94 \cdot SPEI_3(0,8) + 5.44$
IT12	$\log[BA] = -1.26 \cdot SPEI_3(0,8) + 7.43$
IT13	$\log[BA] = -0.66 \cdot SPEI_3(0,8) + 8.88$
IT14	$\log[BA] = -0.65 \cdot SPEI_3(0,8) + 8.04$
IT15	$\log[BA] = -1.08 \cdot SPEI_3(0,8) + 5.62$
IT16	$\log[BA] = -1.29 \cdot SPEI_3(0,6) + 6.48$
PT01	$\log[BA] = -0.97 \cdot SPEI_6(0,9) + 7.77$
PT02	$\log[BA] = -0.82 \cdot SPEI_3(0,7) + 9.49$
PT03	$\log[BA] = -0.55 \cdot SPEI_6(0,9) + 10.84$
PT04	$\log[BA] = -0.43 \cdot SPEI_3(0,8) + 9.86$

Tabla 1: Modelo empírico SPEI-BA. La BA se mide en hectáreas (ha). Las IDs de las eco-regiones corresponden a las definidas en Turco, Von Hardenberg, et al. (2017).

3. RESULTADOS

Las proyecciones de futuro se han calculado mediante la diferencia de los promedios temporales de la variable de estudio entre un período futuro, 2021-2050, y un período de referencia, 1971-2000. La significancia estadística de la diferencia se ha evaluado mediante el t-test de Student. Se han considerado significativos aquellos resultados que muestran un $p\text{-value} < 0.05$. Los cálculos se han llevado a cabo para las diferentes configuraciones del MM5 (acoplado a diferentes modelos globales y considerando varios escenarios emisiones).

3.1 Proyecciones de futuro en la sequía

Según el modelo SPEI-BA, el índice $\text{SPEI}_3(0,8)$ es el que mayor importancia tiene en la BA de verano para la mayoría de las regiones, razón por la que ha sido escogido para ilustrar las proyecciones en la sequía. En la figura 1 se recogen los resultados obtenidos para el conjunto promedio de modelos. En general, la sequía experimenta un aumento en el futuro, o lo que es lo mismo, una disminución del índice $\text{SPEI}_3(0,8)$. Promediando para todas las regiones, el $\text{SPEI}_3(0,8)$ sufre una variación cercana a $-0.19 z$ entre los dos períodos. Aunque aparecen algunas zonas en las que se produce un aumento (costa mediterránea española y norte de Italia), los resultados arrojados no son estadísticamente significativos; en cambio, todas las regiones que muestran resultados significativos experimentan aumentos de la sequía (Portugal, costa oeste de Italia y de Grecia). El promedio espacial de la variación del $\text{SPEI}_3(0,8)$ asociado únicamente a estos lugares es aproximadamente de $-0.41 z$. Es en Grecia donde se observan las variaciones del índice más marcadas, contenidas en el intervalo $[-1, -0.75] z$. Las proyecciones obtenidas para las diferentes configuraciones del MM5 (no mostradas) son coherentes entre sí en las regiones con resultados estadísticamente significativos. Dado que el intervalo temporal entre los períodos futuro y de referencia no es demasiado grande, no se observan grandes diferencias entre escenarios de

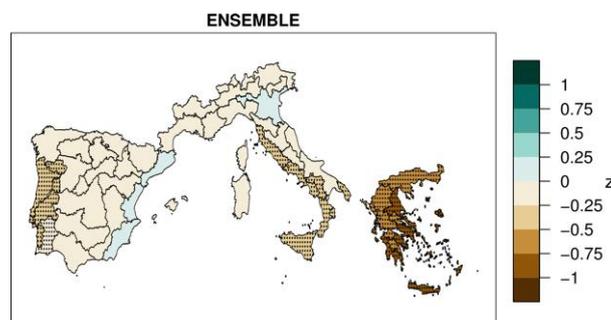


Fig. 1: Variación de los promedios temporales en el conjunto promedio de modelos del índice $\text{SPEI}_3(0,8)$ entre los periodos 2021-2050 y 1971-2000. Las regiones cubiertas con puntos son aquellas que muestran variaciones con $p\text{-value} < 0.05$.

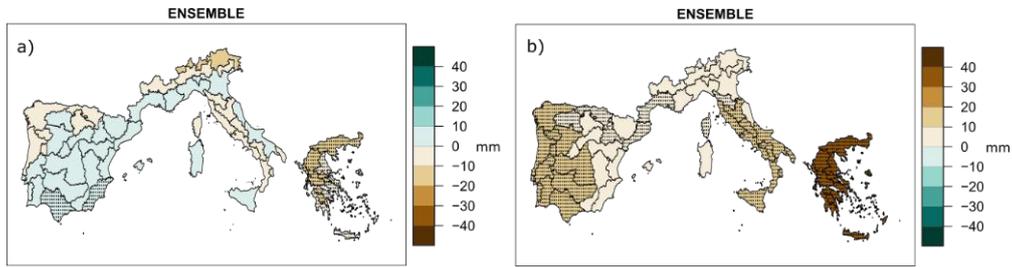


Fig. 2: Variación de los promedios temporales en el conjunto promedio de modelos entre los periodos 2021-2050 y 1971-2000 de: a) $PR_3(0,8)$; b) $PET_3(0,8)$. Las regiones cubiertas con puntos son aquellas que muestran variaciones con $n\text{-value} < 0.05$

emisiones. Por la propia definición del $SPEI_3(0,8)$, su proyección está ligada a las proyecciones de la $PR_3(0,8)$ y la $PET_3(0,8)$ (figura 2). Claramente, se estiman los mayores aumentos en la sequía para los lugares en los que la diferencia $PR_3(0,8) - PET_3(0,8)$ es más negativa (Grecia).

3.1 Proyecciones de futuro en el área quemada

La figura 3a exhibe las variaciones en la BA en miles de hectáreas (kha) para el conjunto promedio de modelos. Como era de esperar teniendo en cuenta lo obtenido para la sequía, hay un incremento generalizado en la BA con un promedio espacial de 1.78 kha para todo el dominio. Se observan reducciones en las regiones del norte y del este de la Península Ibérica y al norte de Italia, aunque carecen de significancia estadística. Todas las regiones con $p\text{-value} < 0.05$ arrojan incrementos en la BA. El promedio espacial considerando únicamente estos lugares presenta un valor de 3.07 kha. Las zonas que experimentan los incrementos más grandes se encuentran en Grecia y en Portugal. En este último caso se observa el mayor aumento neto, contenido en el intervalo [10,15] kha. En la figura 3b se muestran las variaciones relativas en tanto por ciento de los resultados del mapa anterior. La BA aumenta una media del 22% considerando todo el dominio, llegando hasta el 36% promediando solamente las regiones significativas. Cabe destacar la situación de Grecia, que llega a experimentar aumentos entre el 100% y el 150%.

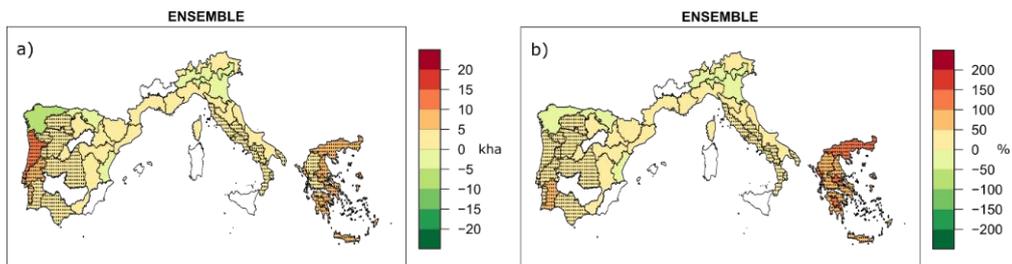


Fig. 3: Variación de los promedios temporales en el conjunto promedio de modelos entre los periodos 2021-2050 y 1971-2000 de: a) BA en kha (miles de hectáreas); b) BA en %. Las regiones cubiertas con puntos son aquellas que muestran variaciones con $p\text{-value} < 0.05$.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era la realización de proyecciones de futuro para la sequía, y el área quemada por los incendios en verano sobre las regiones de la Europa mediterránea. La sequía se ha evaluado mediante el índice SPEI, obtenido a partir de datos de PR y PET procedentes del modelo regional MM5 alimentado por varios modelos globales y considerando diferentes escenarios de emisiones. La BA se ha estimado empleando un modelo empírico de regresión lineal que tiene al SPEI como variable predictora. Las proyecciones se han calculado como las diferencias de los promedios temporales del $SPEI_3(0,8)$ y de la BA entre los períodos 2021-2050 y 1971-2000. Se ha obtenido un aumento generalizado tanto en la sequía como en el área quemada, destacando por su severidad los incrementos en Portugal, en la costa de Italia y en Grecia.

Los resultados conseguidos para el $SPEI_3(0,8)$ complementan a los obtenidos en Spinoni et al. (2016). En ese estudio, para la zona mediterránea en el escenario A1B, los eventos de sequía a escala anual (representados por el $SPEI_{12}$), no solo aumentan en su severidad en general, sino que también en duración y frecuencia. Además, también se obtiene una tendencia negativa en la evolución del $SPEI_3$ (aumento en la severidad de la sequía) para el futuro. Las proyecciones realizadas para la BA siguen la línea de las llevadas a cabo por otros estudios previos que emplearon metodologías de estimación diferentes. Amatulli et al. (2013) obtuvieron unos incrementos promedio de la BA sobre la Europa mediterránea del 66 % y del 140 % en los escenarios de emisiones B2 y A2, respectivamente, entre los períodos 1985-2004 y 2070-2100. En Khabarov et al. (2016) se muestra un incremento aproximado de 150-220 % entre los años 2000 y 2090 en el escenario A2. Cabe señalar que los resultados no son totalmente extrapolables debido a que el período futuro de nuestro estudio (2021-2050) es más cercano al presente que en los trabajos citados.

En las últimas décadas ha tenido lugar un descenso casi generalizado del número de incendios y del área quemada en las regiones del área mediterránea que puede ser explicado, al menos en parte, por el incremento de los esfuerzos dedicados a las actividades de prevención y control de los incendios (Turco et al., 2016). Sin embargo, el mantenimiento de estas prácticas en los niveles actuales podría no ser suficiente para compensar un incremento de la sequía en el futuro. Por este motivo, la capacidad para modelar la relación clima-incendios juega un papel fundamental en la elaboración de estrategias de adaptación efectivas. En particular, las predicciones climáticas estacionales podrían permitir una adaptación más eficaz y dinámica a la variabilidad climática y al cambio climático, ofreciendo la posibilidad de reducir los impactos de las condiciones climáticas adversas en los incendios (Turco et al., 2018). Futuras líneas de trabajo podrían extender este estudio considerando más variables en el modelo de área quemada, analizando el carácter no estacionario de la relación clima-incendios y considerando más modelos regionales.

AGRADECIMIENTOS

Presentamos nuestros agradecimientos al European Forest Fire Information System (EFFIS, <http://effis.jrc.ec.europa.eu>) del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea por la base de datos sobre incendios. Agradecemos también a los

suministradores de la base de datos del índice SPEI (<http://sac.csic.es/spei/database.html>). La participación de Marco Turco ha sido financiada por el programa estatal de ayudas Juan de la Cierva (IJCI-2015-26953).

REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (1998). FAO Penman-Monteith Equation. En *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (pp. 17-28). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Amatulli, G., Camia, A., y San-Miguel-Ayanz, J. (2013). Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries. *Science of the Total Environment*, 450-451, 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.014>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., ... Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth System. *Science*, 324, 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Hao, Z., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., y Farahmand, A. (2014). Global integrated drought monitoring and prediction system. *Scientific data*, 1(140001). <https://doi.org/10.1038/sdata.2014.1>
- IPCC. (2000). *Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (N. Nakicenovic & R. Swart, Eds.). Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- IPCC. (2012). Changes in Impacts of Climate Extremes: Human Systems and Ecosystems. En C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, ... P. M. Midgley (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 231-290). Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, EEUU: Cambridge University Press.
- Jiménez-Guerrero, P., Montáveez, J. P., Domínguez, M., Romera, R., Fita, L., Fernández, J., ... Gaertner, M. A. (2013). Mean fields and interannual variability in RCM simulations over Spain: The ESCENA project. *Climate Research*, 57(3), 201-220. <https://doi.org/10.3354/cr01165>
- Khabarov, N., Krasovskii, A., Obersteiner, M., Swart, R., Dosio, A., San-Miguel-Ayanz, J., ... Migliavacca, M. (2016). Forest fires and adaptation options in Europe. *Regional Environmental Change*, 16(1), 21-30. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0621-0>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., y Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. <https://doi.org/citeulike-article-id:10490403>
- Metzger, M. J., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Múcher, C. A., y Watkins, J. W. (2005). A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 14(6), 549-563. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00190.x>

- Meyn, A., White, P. S., Buhk, C., y Jentsch, A. (2007). Environmental drivers of large, infrequent wildfires: The emerging conceptual model. *Progress in Physical Geography*, 31(3), 287–312.
<https://doi.org/10.1177/0309133307079365>
- Pausas, J. G., y Ribeiro, E. (2013). The global fire-productivity relationship. *Global Ecology and Biogeography*, 22(6), 728-736.
<https://doi.org/10.1111/geb.12043>
- San-Miguel-Ayanz, J., y Camia, A. (2010). Forest fires. En *Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe: An overview of the last decade* (pp. 47-53). Copenhagen, Dinamarca: EEA Technical report. <https://doi.org/10.2800/62638>
- San-Miguel-Ayanz, J., Schulte, E., Schmuck, G., Camia, A., Strobl, P., Liberta, G., ... Amatulli, G. (2012). Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: the European forest fire information system (EFFIS). En J. Tiefenbacher (Ed.), *Approaches to Managing Disaster – Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts* (pp. 87-108). Rijeka, Croacia: InTech. <https://doi.org/10.5772/28441>
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., y Barbosa, P. (2016). *Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts - Past Trends and Future Projections*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union.
<https://doi.org/10.2788/450449>
- Turco, M., Bedia, J., Di Liberto, F., Fiorucci, P., Von Hardenberg, J., Koutsias, N., ... Provenzale, A. (2016). Decreasing fires in mediterranean Europe. *PLoS ONE*, 11(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150663>
- Turco, M., Jerez, S., Doblas-Reyes, F. J., AghaKouchak, A., Llasat, M. C., y Provenzale, A. (2018). Skilful forecasting of global fire activity using seasonal climate predictions. *Nature Communications*, 9(1), 2718.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05250-0>
- Turco, M., Levin, N., Tessler, N., y Saaroni, H. (2017). Recent changes and relations among drought, vegetation and wildfires in the Eastern Mediterranean: The case of Israel. *Global and Planetary Change*, 151, 28-35.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.09.002>
- Turco, M., Llasat, M.-C., von Hardenberg, J., y Provenzale, A. (2014). Climate change impacts on wildfires in a Mediterranean environment. *Climatic Change*, 125(3-4), 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1183-3>
- Turco, M., Llasat, M. C., von Hardenberg, J., y Provenzale, A. (2013). Impact of climate variability on summer fires in a Mediterranean environment (northeastern Iberian Peninsula). *Climatic Change*, 116(3-4), 665-678.
<https://doi.org/10.1007/s10584-012-0505-6>
- Turco, M., Von Hardenberg, J., AghaKouchak, A., Llasat, M. C., Provenzale, A., y Trigo, R. M. (2017). On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Scientific Reports*, 7(81).
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-00116-9>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, 1696–1718.

<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Wilhite, D. A., y Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.

<https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

WMO, y GWD. (2016). *Handbook of drought indicators and indices*. (M. Svoboda & B. A. Fuchs, Eds.), *Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*.

<https://doi.org/10.1007/s00704-016-1984-6>

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., y Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 21(2), 103-115. <https://doi.org/10.1139/a11-013>