

HERRAMIENTAS DE MONITORIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN MEDIANTE MODELIZACIÓN ECOHIDROLÓGICA EN PARQUES CONTINENTALES: EVOLUCIÓN RECIENTE Y PROYECCIONES FUTURAS

SERGIO MARTÍN VICENTE-SERRANO Y JAVIER ZABALZA MARTÍNEZ¹

RESUMEN

Este estudio ha desarrollado una amplia modelización ecohidrológica en los Parques Nacionales continentales de España. Se ha obtenido una base de datos que muestra la evolución temporal de diferentes variables relacionadas con el clima, la actividad y crecimiento vegetal y la hidrología del suelo mediante un proceso de simulación de base ecofísica. La base de datos ha sido validada mediante datos de campo, en concreto, series de actividad vegetal obtenidas a partir de imágenes de satélite y series de crecimiento secundario a partir de dendrocronologías. El modelo ha sido forzado mediante un escenario climático para determinar posibles cambios en las variables de actividad y crecimiento vegetal asociados con el cambio climático. La base de datos ha sido incluida en un visor web en el que toda la información es consultable y descargable.

Se ha comprobado que durante el periodo de análisis se han registrado cambios en el índice de área foliar (LAI, leaf area index en su traducción al inglés) y en el crecimiento de los bosques por medio de la producción primaria neta (NPP, net primary production en su traducción al inglés). Existe un desacople generalizado entre las tendencias en la actividad foliar y la producción primaria neta, con parques en los que el incremento en el índice de área foliar no se observa en el caso de la NPP. Existen diferencias importantes en las tendencias del LAI y la NPP entre diferentes Parques Nacionales, pero también a nivel estacional y entre cubiertas vegetales de diferente densidad. No se aprecian cambios muy marcados, salvo en los parques más húmedos en el caso de la LAI. La NPP no muestra tendencias muy claras, salvo en sectores muy concretos. Los escenarios a futuro no indican, en los parques analizados, un cambio sustancial hacia un descenso del LAI o la NPP. Si bien, nos hemos centrado en aquellos más húmedos en los que la principal limitación para el desarrollo vegetal es la temperatura o la radiación.

Palabras clave: Variabilidad climática, bosques, modelización ecohidrológica, índice de área foliar, producción primaria neta.

¹ Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IPE-CSIC), Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, Spain, svicen@ipe.csic.es

VEGETATION MONITORING TOOLS BY MEANS OF ECOHYDROLOGICAL MODELLING IN CONTINENTAL PROTECTED AREAS OF SPAIN: RECENT EVALUATION AND FUTURE PROJECTIONS

ABSTRACT

ECOHIPRO has developed an ecohydrological modeling in the main natural protected areas of Spain. The project has developed a spatial database that contains the simulation of the temporal variability of different variables related to the climate, plant activity and growth and soil hydrology through an eco-physical simulation process. The database has been validated through field data, specifically, series of plant activity obtained from satellite imagery and series of secondary growth from tree-ring records. The model has been forced through a climate scenario in order of determining possible changes in plant activity and growth associated with climate change. The database has been included in a web server in which all the generated information from 1982 to 2014 is available to be consulted and downloaded. From a scientific point of view, it has been verified that simulations record some changes in the leaf area index (LAI) and the net primary production (NPP). The changes recorded had different sign considering both the seasonal variability and the characteristic of the vegetation types. In addition, important differences were recorded between some of the analyzed areas. Main results indicate a generalized decoupling between the simulated trends in foliar activity and net primary production with parks in which the increase in the leaf area index is observed considering the NPP/NPP. In any case, there are not important changes, except in the wetter parks and considering the LAI. The NPP/NPP does not show v trends except in very specific sectors. Future scenarios do not indicate a substantial change towards a decrease in the LAI or the NPP. Although, we have focused on the wettest areas in which the main limitation for plant development is temperature or radiation.

Keywords: Climate variability, forests, ecohydrological modelling, leaf área index, net primary production.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se asiste globalmente a un proceso de cambio climático que se traduce, sobre todo, en un aumento de los valores de temperatura (JONES *et al.*, 2012), pero también de cambios asociados en otros parámetros climáticos como la velocidad del viento (MCVICAR *et al.*, 2012), la humedad atmosférica, evaporación (WANG *et al.*, 2012) y cambios regionales en la magnitud, frecuencia e intensidad de las precipitaciones (SIMMONS *et al.*, 2010). Estos cambios han dado lugar a impactos en comunidades vegetales muy diversas. Por ejemplo, se ha sugerido un descenso del crecimiento en los bosques ubicados en zonas templadas, debido a un au-

mento de la demanda de agua por parte de la atmósfera, como consecuencia del aumento de las temperaturas y de la presión del vapor de agua en la atmósfera (JONES *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2012; CLIFFORD *et al.*, 2013; BRESHEARS *et al.*, 2013; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2014), lo que ha conducido a un aumento de la frecuencia de fenómenos de decaimiento y mortalidad en bosques (ALLEN *et al.*, 2010); incluyendo la Península Ibérica (SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2012; CAMARERO *et al.*, 2015). Sin embargo, todos estos cambios resultan complejos, jugando un importante papel la diferente resistencia de las comunidades vegetales al estrés hídrico (CHAVES *et al.*, 2003; MCDOWELL *et al.*, 2008), el diferente impacto de distintos tipos de sequías (VICENTE

-SERRANO *et al.*, 2013) e incluso el efecto conjunto de la variabilidad climática y el incremento de los niveles de CO₂ atmosférico (SMITH *et al.*, 2000; LEVESQUE *et al.*, 2014; CAMARERO *et al.*, 2015b).

La causa del incremento de los impactos del clima sobre las comunidades vegetales no está clara (ANDEREGG *et al.*, 2012). Pero el resultado es evidente: el descenso de la actividad, crecimiento y fijación de carbono en los ecosistemas; en algunos casos el decaimiento de la vegetación y en aquellos ecosistemas más vulnerables, el desencadenamiento de episodios de mortalidad forestal (WILLIAMS *et al.*, 2010).

En España se asiste a un notable cambio del clima en las últimas décadas. El aspecto más llamativo ha sido el incremento térmico de entre 1-1.5 °C desde 1960 hasta la actualidad (BRUNET *et al.*, 2007), junto a un aumento de los episodios térmicos más extremos, con un incremento en la intensidad y frecuencia de olas de calor estivales (EL KENAWY *et al.*, 2011). Los cambios en las precipitaciones muestran una mayor incertidumbre espacial (GONZÁLEZ-HIDALGO *et al.*, 2011). Junto a los cambios en precipitaciones y temperaturas hay que destacar notables cambios en la humedad atmosférica, con un descenso en los niveles de humedad relativa (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2014b), el incremento de la radiación, fruto de los menores porcentajes de nubosidad (SÁNCHEZ-LORENZO *et al.*, 2009) y junto al aumento térmico, un notable incremento de la demanda de agua por parte de la atmósfera (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2014b), que en general implica un aumento del estrés hídrico que sufre la vegetación en ambientes que van desde los semiáridos a las subhúmedos (LINARES Y CAMARERO, 2012; CARNICER *et al.*, 2011).

Los impactos de estos cambios en el clima ya se están observando en diferentes comunidades vegetales en España. De hecho, en ambientes limitados por las condiciones hídricas el incremento térmico puede estar teniendo ya notables consecuencias. Normalmente, un aumento de las temperaturas tiene un efecto positivo sobre la actividad y crecimiento forestal; sin embargo, el efecto es negativo si no hay un correspondiente aumento en la precipitación, pues se incremen-

tan las condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, los resultados pueden ser muy variables en el espacio. Por ejemplo, MARTÍNEZ-VILLALTA *et al.* (2008) demostraron que, en las partes más secas del noreste de España, el efecto de aumento de la temperatura era siempre perjudicial al crecimiento, mientras que el efecto resultaba positivo en las zonas húmedas, favoreciendo el avance de los bosques en zonas subalpinas (CAMARERO Y GUTIÉRREZ, 2004). En las simulaciones realizadas en OSBORNE *et al.* (2000) en zonas arbustivas mediterráneas indicaron que la producción primaria neta (net primary production, NPP) potencial había aumentado en un 25% y el índice de área foliar (leaf area index, LAI) en un 7% durante el siglo pasado, aunque el aumento absoluto del LAI fue pequeño. VICENTE-SERRANO *et al.* (2006) demostraron una relación espacial directa entre actividad de la vegetación y la aridez en los bosques de frondosas y de coníferas en España. LLORET *et al.* (2007) también han demostrado que la diversidad-relación entre la estabilidad de la actividad forestal y la sequía en España sigue un gradiente climático, siendo las localidades más secas las más afectadas (VICENTE-SERRANO, 2007; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2010 y 2012). No obstante, las zonas más húmedas, como los bosques de montaña, también se ven afectados por el agravamiento de las condiciones de estrés hídrico (PASHO *et al.*, 2011; LINARES Y CAMARERO, 2012; SÁNCHEZ-SALGUERO *et al.*, 2012; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2015).

En general, todos los estudios revisados apuntan a que el incremento de la aridez, como consecuencia del descenso de las precipitaciones y –principalmente– del aumento de las temperaturas, está reduciendo la actividad y crecimiento de bosques. Las proyecciones climáticas futuras para la Región mediterránea muestran una tendencia hacia condiciones mucho más cálidas (GIBELIN Y DEQUÉ 2003, GIORGI 2006, COOK *et al.*, 2014). Las sequías de una severidad esperada cada 100 años es posible que se produzcan cada 10 años en el norte de la cuenca Mediterránea (WEISS *et al.* 2007).

Estos cambios pueden tener consecuencias muy negativas para los ecosistemas continentales de España, que se encuentran en un estado de equi-

librio muy inestable, sujetos en amplias áreas a procesos de sucesión natural, y son muy vulnerables a los cambios. Por esta razón, un adecuado análisis histórico de la dinámica de las comunidades vegetales, a partir de diferentes parámetros de crecimiento vegetal, en los Parques Nacionales continentales de la Península Ibérica resulta muy útil para plantear herramientas de seguimiento de la vegetación en tiempo real y alerta temprana de situaciones de riesgo (decaimiento, mortalidad, etc.). Por ello, en el proyecto se ha desarrollado una metodología basada en la modelización ecohidrológica, que permite monitorizar el estado de la cubierta vegetal en tiempo real y analizar la dinámica reciente de las comunidades vegetales y generar una información de libre disposición útil para la comunidad científica que trabaja en ecología y cambio global en España.

MATERIAL Y MÉTODOS

El proyecto ha analizado la evolución de la cubierta vegetal en diferentes Parques Nacionales de la España continental: Picos de Europa, Ordesa y Monte Perdido, Aigües Tortes i Estany de Sant Maurici, Sierra de Guadarrama, Monfragué, Cabañeros y Sierra Nevada mediante parámetros de vegetación simulados a partir de un modelo ecohidrológico: LAI y NPP. Con la finalidad de validar las estimaciones realizadas por el modelo, se comprobó la relación entre dichos parámetros de cubierta vegetal y la dinámica observada a partir de variables obtenidas de series temporales de imágenes de satélite y series de dendrocronologías. Ello ha permitido el desarrollo de una herramienta de monitorización de la vegetación a partir de las simulaciones ecohidrológicas. El proceso metodológico se ha basado en una serie de tareas específicas que se detallan a continuación.

Desarrollo de las bases de datos necesarias para la aplicación del modelo eco-hidrológico en los diferentes parques nacionales

A lo largo del proyecto se analizaron 4949 estaciones de temperatura y 10310 de precipitación (1967-2014) obtenidas de la Agencia Estatal de

Meteorología. El análisis contó con un minucioso control de calidad en un proceso semi-automático con el fin de generar una base de datos espacial a escala diaria y con una resolución espacial de 1.1 x 1.1 km para cada una de las variables (Figura 1). También se obtuvieron y organizaron en un formato común las capas de vegetación y tipo de suelo en los diferentes Parques Nacionales, además de los datos de caudal necesarios para llevar a cabo la calibración en cada uno de los parques. Finalmente, con la finalidad de validar las salidas del modelo, también se generó una base de datos del índice de vegetación normalizada obtenido mediante imágenes de satélite NOAA-AVHRR (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2019) y una base de datos de dendrocronologías obtenidas en diferentes bosques de los Parques Nacionales.

Calibración de la hidrología del suelo a partir de los datos de caudal

La calibración se realizó mediante el modelo RESHSSys (<https://github.com/RHESSys>) (TAGUE Y BAND, 2004) para modelizar la producción primaria neta y la actividad foliar en el conjunto de comunidades vegetales de los parques. RHESSys está diseñado para capturar los flujos bidireccionales correspondientes a procesos hidrológicos y ecológicos (uso de carbono y agua por parte de la vegetación) y sus patrones espaciales dentro de una cuenca hidrográfica (BAND *et al.*, 2000; TAGUE, 2009). Otra característica, no menos importante, es que este modelo resulta distribuido espacialmente. RHESSys computa diferentes procesos hidrológicos, climáticos y de vegetación a una escala espacial de unidad de paisaje; cada uno de las cuales comprende condiciones homogéneas de tipo y espesor de cubierta, topografía y tipo de suelo. RHESSys comprende los flujos verticales de humedad (intercepción, transpiración, suelo, evapotranspiración, infiltración y procesos de escorrentía subsuperficial hacia los acuíferos), así como los flujos laterales entre unidades de paisaje homogéneas como función de gradientes topográfico y parámetros hidráulicos del suelo. Por otro lado, el ciclo biogeoquímico de los ecosistemas incluye la representación de los procesos de carbono (fotosíntesis y asignación de recursos, respira-

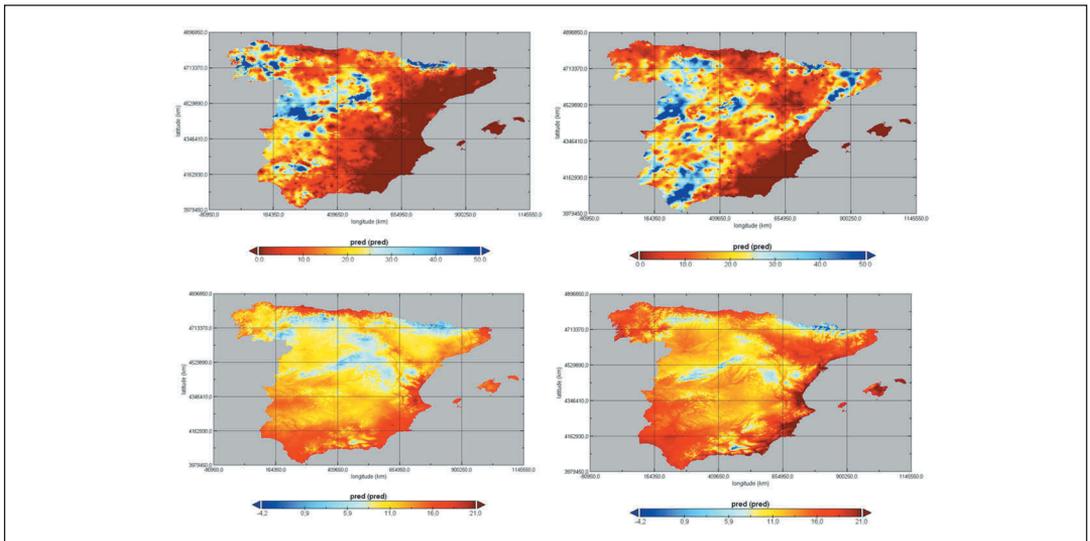


Figura 1. Ejemplo de la cartografía de las variables climáticas.

Figure 1. Examples of climate variables mapping.

ción de los suelos y de la vegetación, procesos de descomposición) junto con los procesos del ciclo del nitrógeno, incluyendo nitrificación y denitrificación (TAGUE, 2009).

La calibración se realizó mediante la partición de la superficie de cada uno de los Parques Nacionales de acuerdo a sus diferentes cuencas de drenaje, con la finalidad de ajustar los parámetros de infiltración vertical y horizontal del agua en el suelo. En los casos en los que los parques fueron superficialmente muy extensos (p.ej. en el caso de Sierra Nevada) o no fuera posible llevar a cabo una calibración debido a la falta de estaciones de aforo, se utilizaron los parámetros de aquellos sectores que presentaban unos buenos ajustes de calidad en la calibración. Este fue uno de las fases más laboriosas del proyecto, con unas necesidades muy amplias en computación. En la Tabla 1 se muestran por ejemplo, los resultados de la calibración del modelo ecohidrológico en diferentes sectores de los Parques Nacionales de acuerdo a la disponibilidad de series de caudal.

En el caso de Sierra Nevada, debido a limitaciones en los datos meteorológicos y también como consecuencia de la excesiva compartimentación

en cuencas hidrográficas del parque, hubo muchos problemas para la obtención de simulaciones robustas durante todo el periodo de tiempo. Por esta razón, solamente pudo realizarse una simulación de este parque desde el año 2005, a partir del que hay más datos meteorológicos en altura que permitieran una modelización de mayor confianza. Por ello, el parque de Sierra Nevada no fue analizado en detalle. Sin embargo, los datos simulados disponibles (2006-2014) sí que fueron incluidos en el visor web de consulta y descarga de datos. De este modo, el visor incluye información de todos los parques con las limitaciones temporales detalladas en el caso del de Sierra Nevada.

Modelización de las variables de actividad vegetal

A partir del modelo calibrado en cada cuenca, RHESSys obtuvo para cada una de las manchas de cobertura del suelo series temporales de las diferentes variables detalladas arriba. En la Figura 2 se muestran ejemplos con la evolución de diferentes variables modelizadas en diferentes Parques Nacionales. Se llevó a cabo una validación de las salidas del modelo mediante los datos disponibles del Índice de Vegetación Normaliza-

Glosario:

NPP: Net primary Production. Producción Pirmaria Neta

LAI: Leaf Area Index. Índice de Área Foliar

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index. Índice de Vegetación Normalizado.

				NSE	PBIAS	RSR	
MONFRAGÜE	Torrejón	Calibración	1995-2004	0.50	-13.60	2.10	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f44336; margin-bottom: 5px;"></div> No satisfactorio <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #ffc107; margin-bottom: 5px;"></div> Satisfactorio <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #6c757d; margin-bottom: 5px;"></div> Bueno <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #28a745; margin-bottom: 5px;"></div> Muy Bueno </div>
		Validación	2005-2009	0.51	-15.00	1.20	
SIERRA NEVADA	Puente Orgiva	Calibración	2006-2014	0.50	-20.00	1.70	
		Validación	2005-2014	0.71	-4.40	3.20	
CABAÑEROS	Cantos Blancos	Calibración	1995-2004	0.71	-4.40	3.20	
		Validación	2005-2014	0.55	-14.30	1.40	

Tabla 1. Estadísticos de calibración/validación de las subcucnas simuladas en los Parques Nacionales de Monfragüe, Sierra Nevada y Cabañeros.

Table 1. Calibration(validation statistics for simulated subcatchments in the National Parks of Monfragüe, Sierra Nevada and Cabañeros.

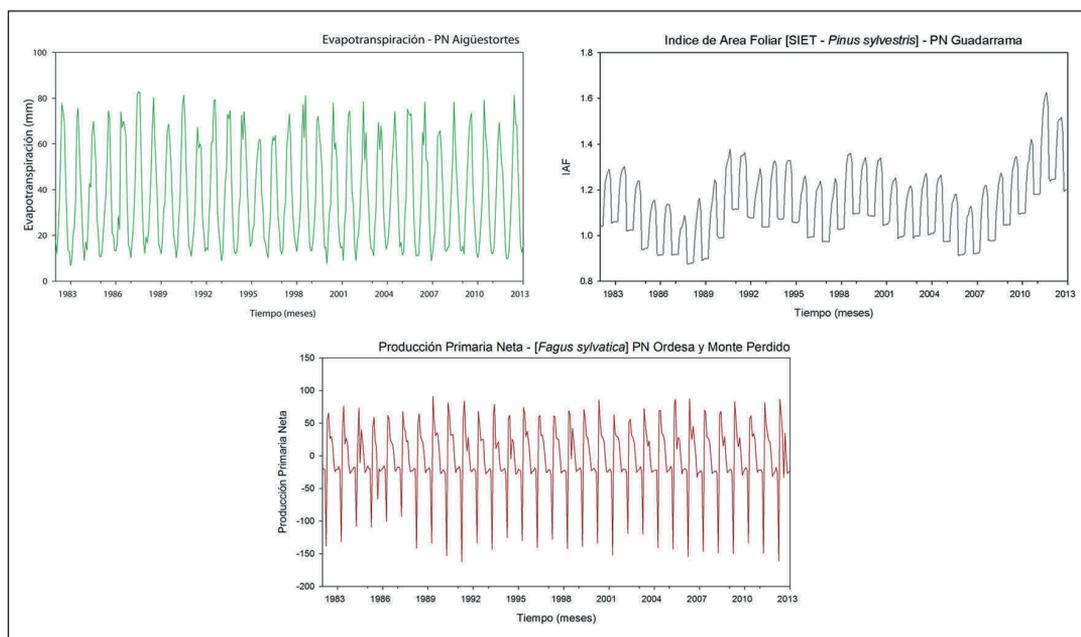


Figura 2. Ejemplos con la evolución de las variables modelizadas en diferentes Parques Nacionales.

Figure 2. Example of the evolution of the modelling variables in different National Parks.

do (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) y de registros dendrocronológicos. En general, la variabilidad temporal del índice de área foliar (LAI) presenta un elevado grado de ajuste con los observado mediante las series de NDVI, al recoger la misma estacionalidad en ambas

variables. La Figura 3 ejemplifica en un bosque del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido este comportamiento. Los valores acumulados de NPP también muestran una razonable relación con los valores de crecimiento secundario en diferentes bosques, tal como se ejemplifica en

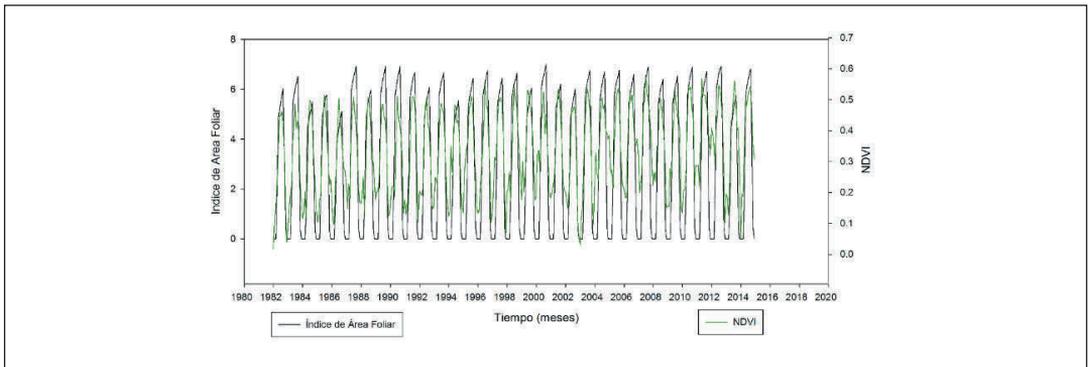


Figura 3. Evolución temporal del NDVI y del índice de área foliar en un hayedo del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido.
Figure 3. Temporal evolution of NDVI and LAI in a *Fagus sylvatica* forest of the National Park of Ordesa and Monte Perdido.

la Figura 4 a partir de dos bosques localizados en Ordesa y Monte Perdido y en Guadarrama. Hay que destacar que en el proceso de simulación se han obtenido más de 12000 series temporales de cada una de las variables indicadas, con una resolución temporal diaria que se agrupó a quincenal (para su publicación en el servidor de datos) y mensual (para el desarrollo de los análisis estadísticos) y que pueden ser consideradas como representativas de la evolución de la actividad/cobertura foliar y producción vegetal en los parques.

Generación de la base de datos con los resultados de las simulaciones

Inicialmente, RHESSys debe trabajar con unidades espaciales que corresponden con las teselas fundamentales de información. En este caso, se trata de manchas de vegetación homogéneas en cuanto a tipo de cubierta y condiciones topográficas. Para el manejo de toda la información se generaron archivos en tres dimensiones dentro del formato R correspondientes a cada uno de los parques que englobaban todas las variables modelizadas. A partir de dichos archivos se realizaron los análisis estadísticos para obtener los resultados sobre la evolución y las tendencias en los parámetros de la vegetación (índice de área foliar y producción primaria neta). La Figura 5 resume la estructura de la base de datos. Sin

embargo, este tipo de estructura no resultaba la más óptima para la generación del servidor cartográfico de datos, por lo que para facilitar la visualización y consulta de datos se llevó a cabo una rasterización de la información a una resolución de 100 metros de lado, generándose nuevos arrays tridimensionales referenciados a celdas concretas. Dichos arrays fueron almacenados en archivos en formato netcdf que son los que se pueden consultar y descargar del servidor de datos.

Generación del servidor de datos con las series modelizadas de las diferentes variables

Se ha llevado a cabo un visor de datos cartográfico que permite tanto la visualización como la descarga de los datos del proyecto. Dicho visor de datos se encuentra disponible en la dirección (<http://parquesactividad.csic.es>). El servidor permite navegar entre variables y fechas visualizando mapas e información; y permite tanto descargar la información completa de cada variable, como consultar los datos de un solo punto. El visor también permite llevar a cabo consultas a lo largo de la base de datos temporal y visualizar la dinámica en el periodo 1982-2014. En las Figuras 6 y 7 se muestran ejemplos de las funcionalidades del visor de datos desarrollado en el marco del proyecto ECOHYPRO.

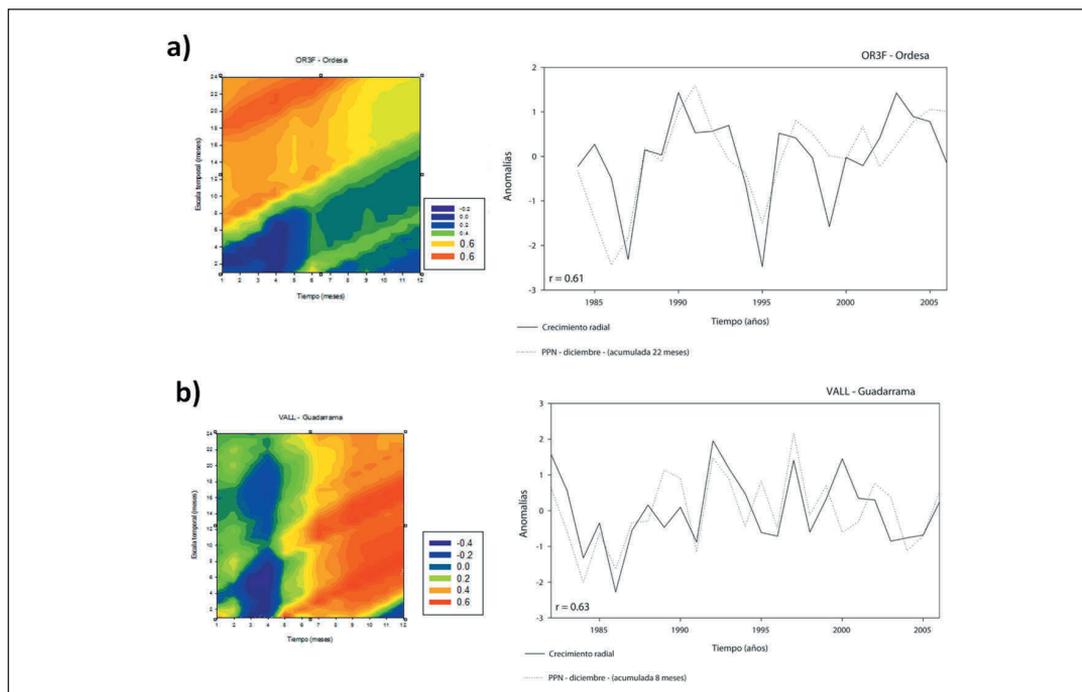


Figura 4. a) Evolución de los datos dendrocronológicos observados y la simulación de NPP acumulada en el mes de diciembre en OR3F (*Fagus sylvatica*. PN Ordesa y Monte Perdido) y en el mes de diciembre en VALL (*Pinus sylvestris*. PN Guadarrama).

Figure 4. Evolution of dendrochronological data and the simulated cumulative NPP in December in OR3F (*Fagus sylvatica*. National Park of Ordesa and Monte Perdido) and in December in VALL (*Pinus sylvestris*, National Park of Guadarrama).

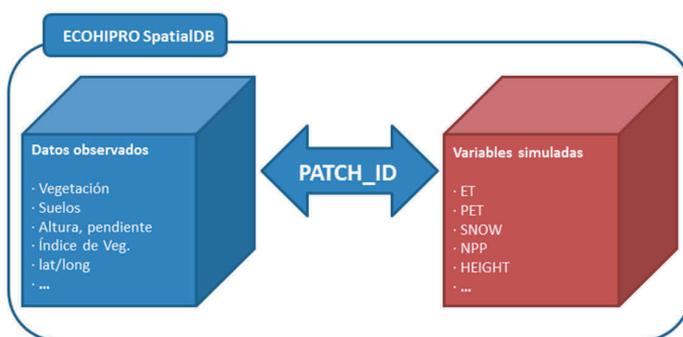


Figura 5. Esquema de la estructura de la base de datos desarrollada en el proyecto ECOHIPRO.

Figure 5. Scheme of the databases structure developed in the project ECOHIPRO.

Herramientas de monitorización de la vegetación mediante modelización ecohidrológica en parques continentales:
Evolución reciente y proyecciones futuras

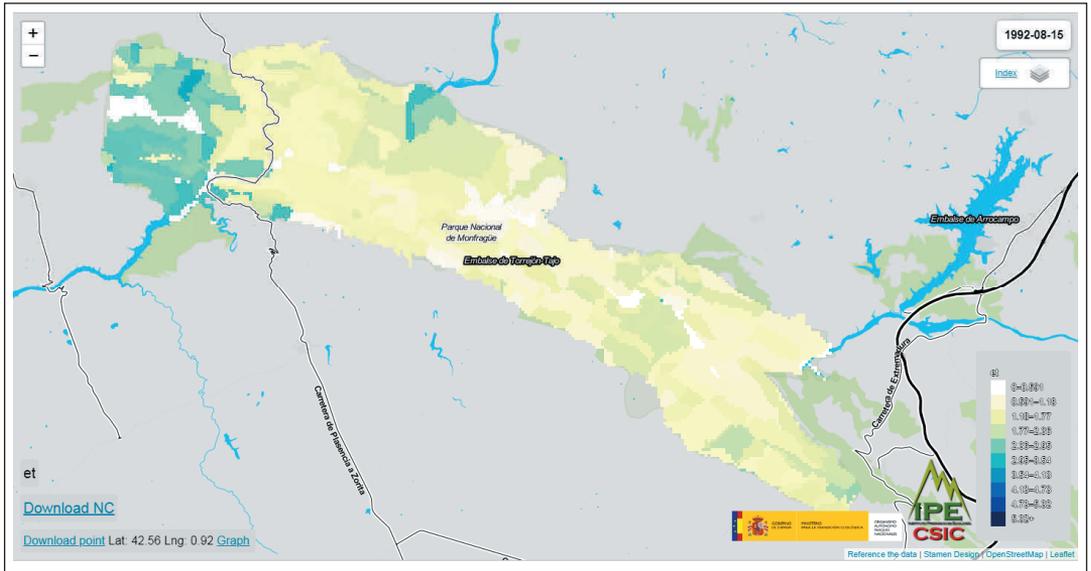


Figura 6. Ejemplo del visor y servidor de datos en el Parque Nacional de Monfragüe.

Figure 6. Example of the web viewer and data server in the National Park of Monfragüe.

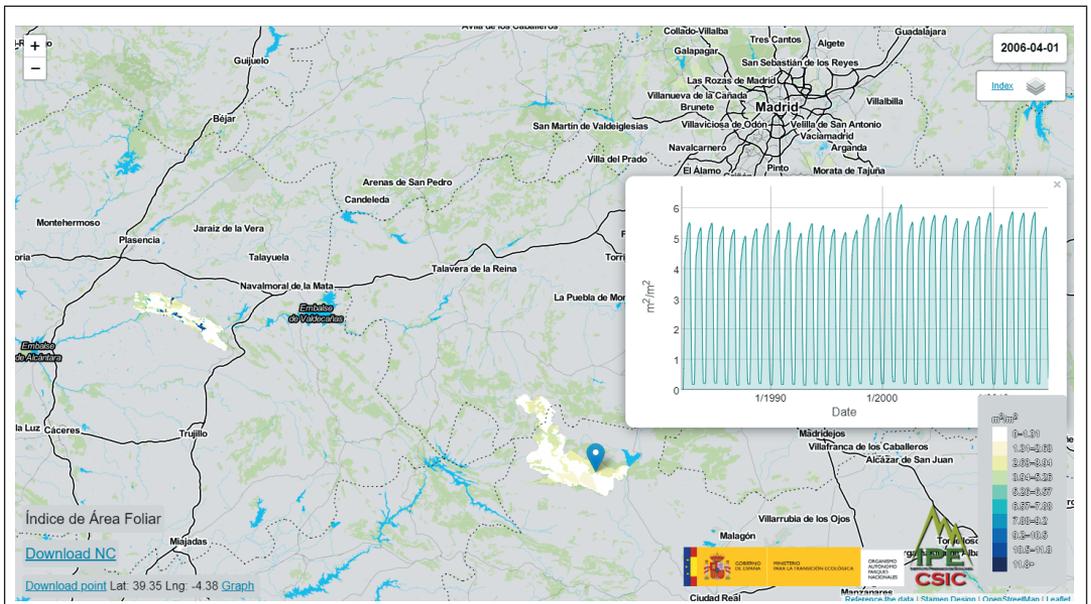


Figura 7. Ejemplo del visor y servidor de datos en el Parque Nacional de Cabañeros con la evolución del LAI en el punto seleccionado.

Figure 7. Example of the web viewer and data server in the National Park of Cabañeros with the evaluation of the LAI in the selected point.

RESULTADOS

Entre los aspectos más significativos, hay que destacar que tanto la NPP (Figura 8) como el LAI (Figura 9) muestran diferencias estacionales contrastadas y valores medios muy diferentes entre los distintos parques. En general, en los diferentes parques el índice de área foliar es superior en la estación estival, mientras que la producción primaria neta es positiva durante esa misma estación. Sin embargo, existen notables excepciones. Por ejemplo, la producción primaria neta en Cabañeros es netamente positiva entre Abril y Junio, mientras que en los meses de verano presenta una muy elevada variabilidad interanual, con años en los que el balance es positivo, mientras que en otros años el balance es negativo. En otros parques como Guadarrama, la estacionalidad es muy diferente, con máximos al final del verano y una marcada variabilidad interanual.

La evolución temporal muestra cambios notables en algunos de los parques analizados. El comportamiento temporal del índice de área foliar es mucho más homogéneo estacional y anual que lo observado en la producción primaria neta, que muestra diferencias mucho más marcadas entre las diferentes series mensuales y también en el promedio anual. En el anexo se recoge de forma detallada la evolución de los datos medios de LAI y NPP en los diferentes parques. Las Figuras 10 y 11 llevan a cabo una comparación entre los diferentes parques. En general, los cambios más importantes se registran en el caso del índice de área foliar, y sobre todo en los parques localizados en las zonas más húmedas, como es el caso de Ordesa y Monte Perdido y Picos de Europa. En Picos de Europa el incremento del LAI es estadísticamente significativo durante todos los meses del año y también a escala anual. Lo mismo sucede en el caso de Ordesa y Monte Perdido. Sin embargo, Aigües Tortes i Estany de Sant Maurici es una excepción ya que se registra un descenso dominante en el índice de área foliar. Por el contrario, en Cabañeros, Guadarrama y Monfragüe no existen cambios significativos en el LAI, tanto a nivel mensual como anual. La hipótesis que explicaría estas diferencias entre los diferentes parques radica probablemente en los diferentes niveles de humedad característi-

cos de los parques. Las condiciones de humedad probablemente modularían el papel del incremento térmico y de la demanda de agua por parte de la atmósfera observada en las últimas décadas. En aquellos parques más Mediterráneos, en los que el crecimiento de la vegetación está más determinado por las limitaciones de agua (Guadarrama, Monfragüe y Cabañeros), el incremento térmico observado en las últimas décadas podría provocar condiciones de mayor estrés en la vegetación. Por el contrario, en aquellos parques más húmedos, el limitante para la actividad vegetal no es habitualmente la disponibilidad hídrica, sino las condiciones de temperatura y radiación, por lo que el incremento térmico, siempre que las reservas de agua en el suelo resulten adecuadas, podría facilitar una mayor actividad e incremento de la masa foliar. La excepción de Aigües Tortes i Estany de Sant Maurici podría explicarse por los severos episodios de sequía que afectaron a esta región a lo largo de las décadas de 1990 y 2000, afectando a las simulaciones de esta variable por parte del modelo, pero esto es una hipótesis que precisaría de análisis más detallados para ser confirmada.

Frente a las tendencias señaladas en el índice de área foliar en algunos parques, la producción primaria neta ha mostrado, de forma promedio, una mayor estabilidad, tanto mensual como anualmente. De hecho, a nivel promedio únicamente se registran cambios significativos en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, con un incremento a escala anual y en diciembre en Aigües Tortes i Estany de Sant Maurici. La variabilidad interanual es muy superior en el caso de la NPP, aspecto que reforzaría recientes hipótesis basadas en observaciones de actividad vegetal y crecimiento secundario, que sostienen que bajo condiciones de estrés por parte de la vegetación, ésta daría un papel preponderante al mantenimiento de la actividad frente a la fijación de carbono en forma de crecimiento, el cual dependería en mayor medida de la variabilidad climática. Los resultados obtenidos de forma media para los parques analizados sugieren pues que la producción primaria neta de las masas vegetales no ha variado en exceso en las últimas cuatro décadas en las que se ha producido un notable incremento térmico. No obstante,

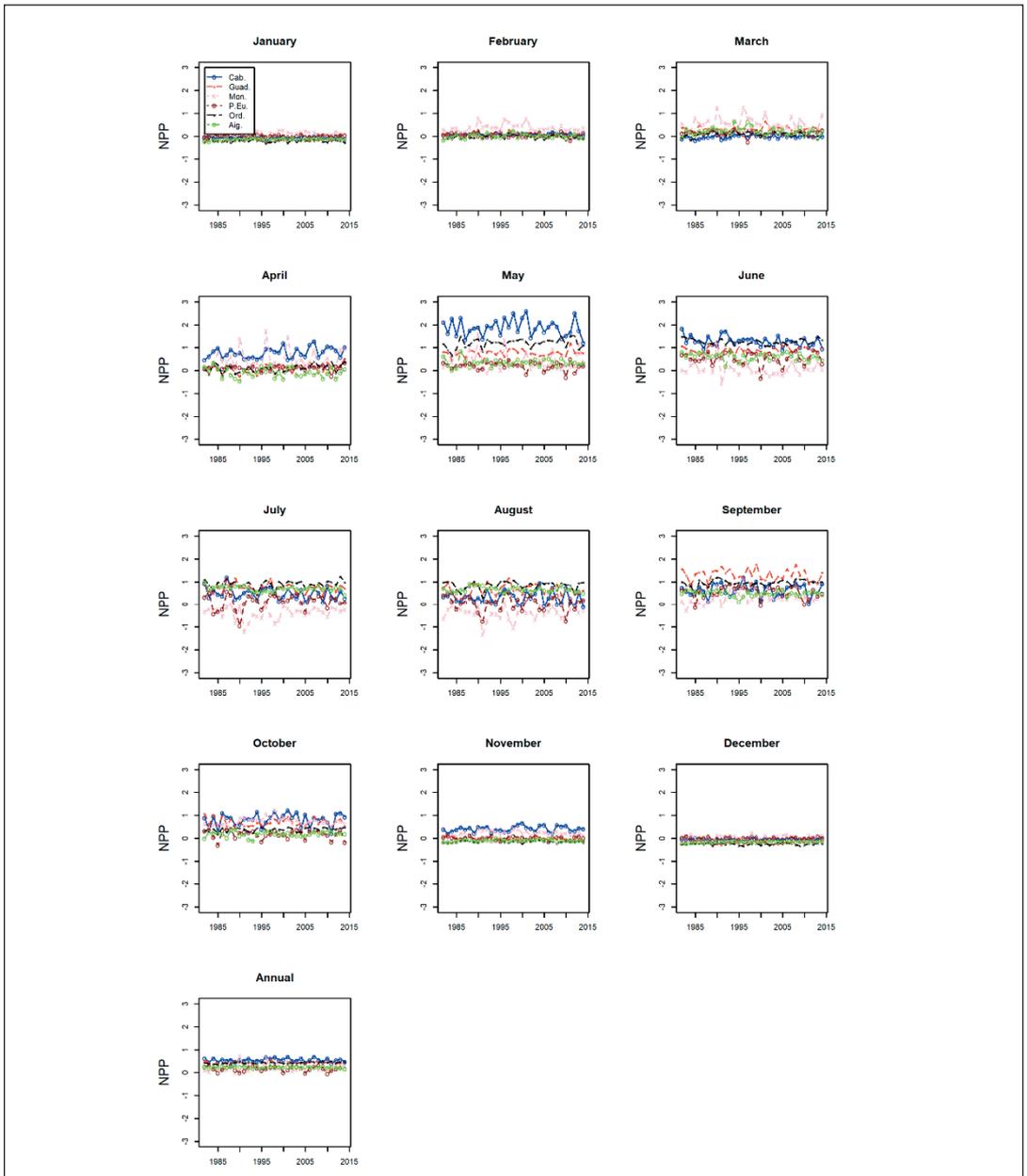


Figura 8. Evolución de la producción primaria neta en los diferentes parques analizados.

Figure 8. Evolution of net primary production in the different analysed National Parks.

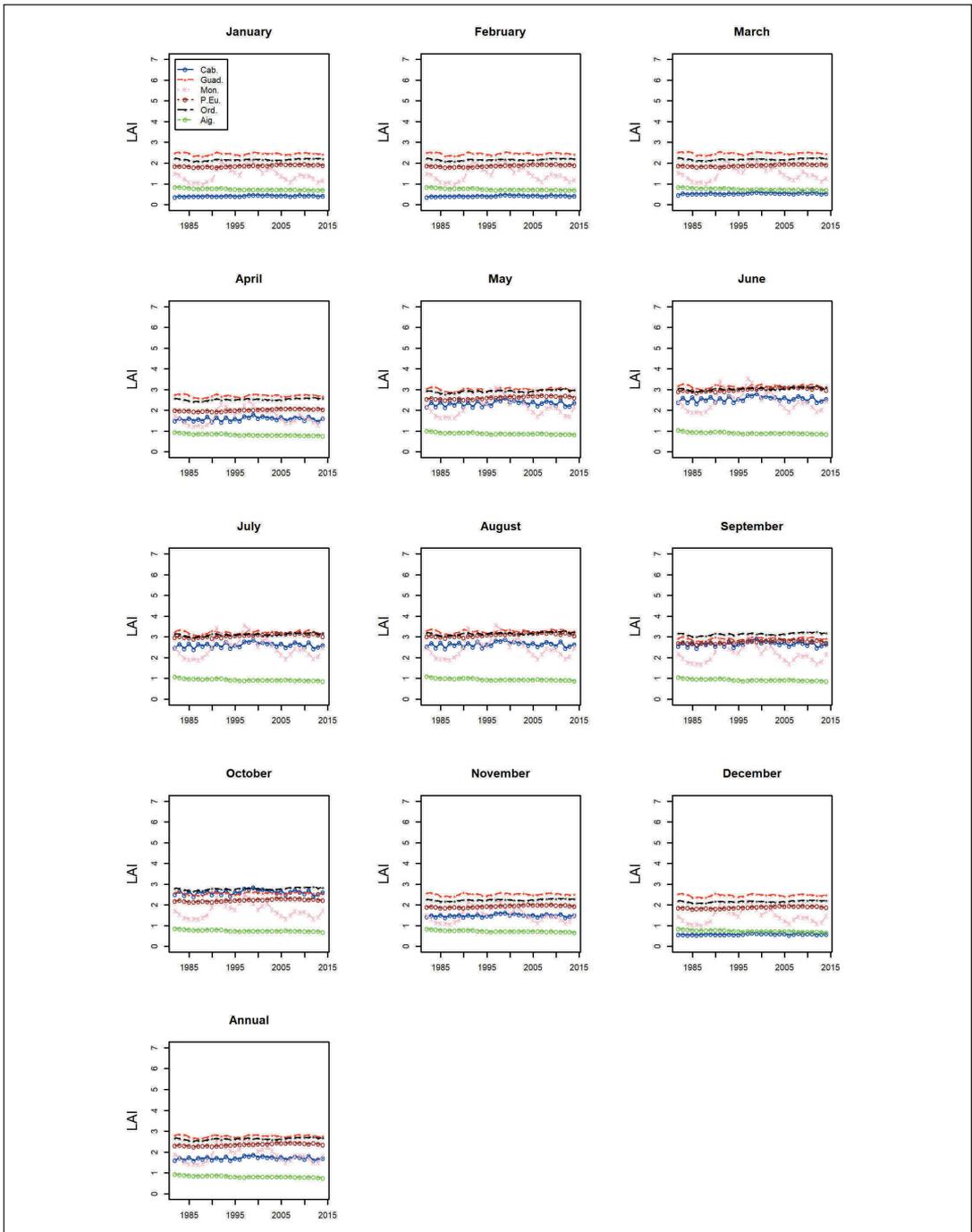


Figura 9. Evolución del índice de área foliar medio mensual y anual en los diferentes parques analizados.
Figure 9. Evolution of the monthly and annual average LAI in the different National Parks.

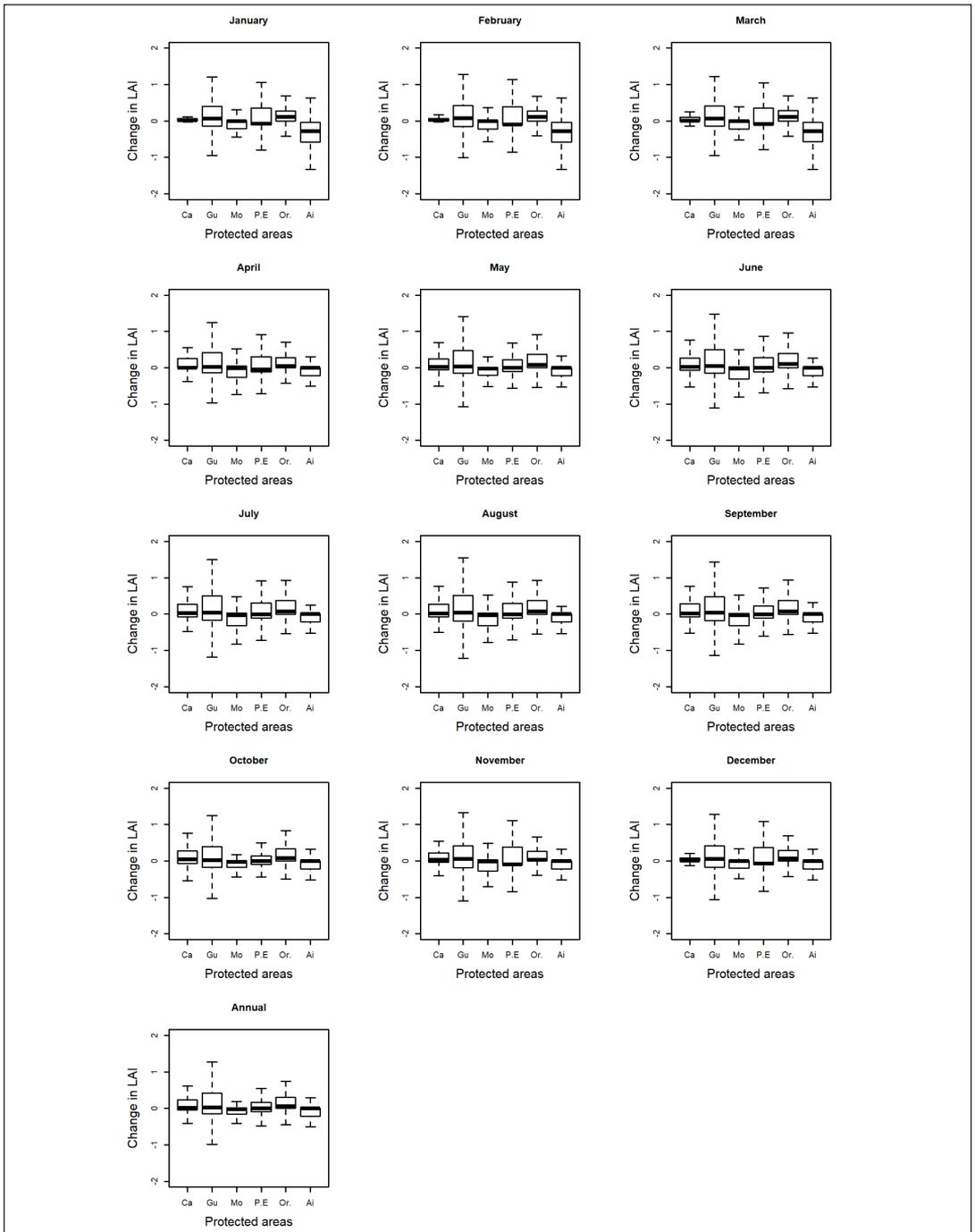


Figura 10. Diagramas de cajas sobre los cambios en el índice de área foliar en los diferentes parques analizados.
Figure 10. Box-plots with the data of changes of leaf area index in the different National Parks.

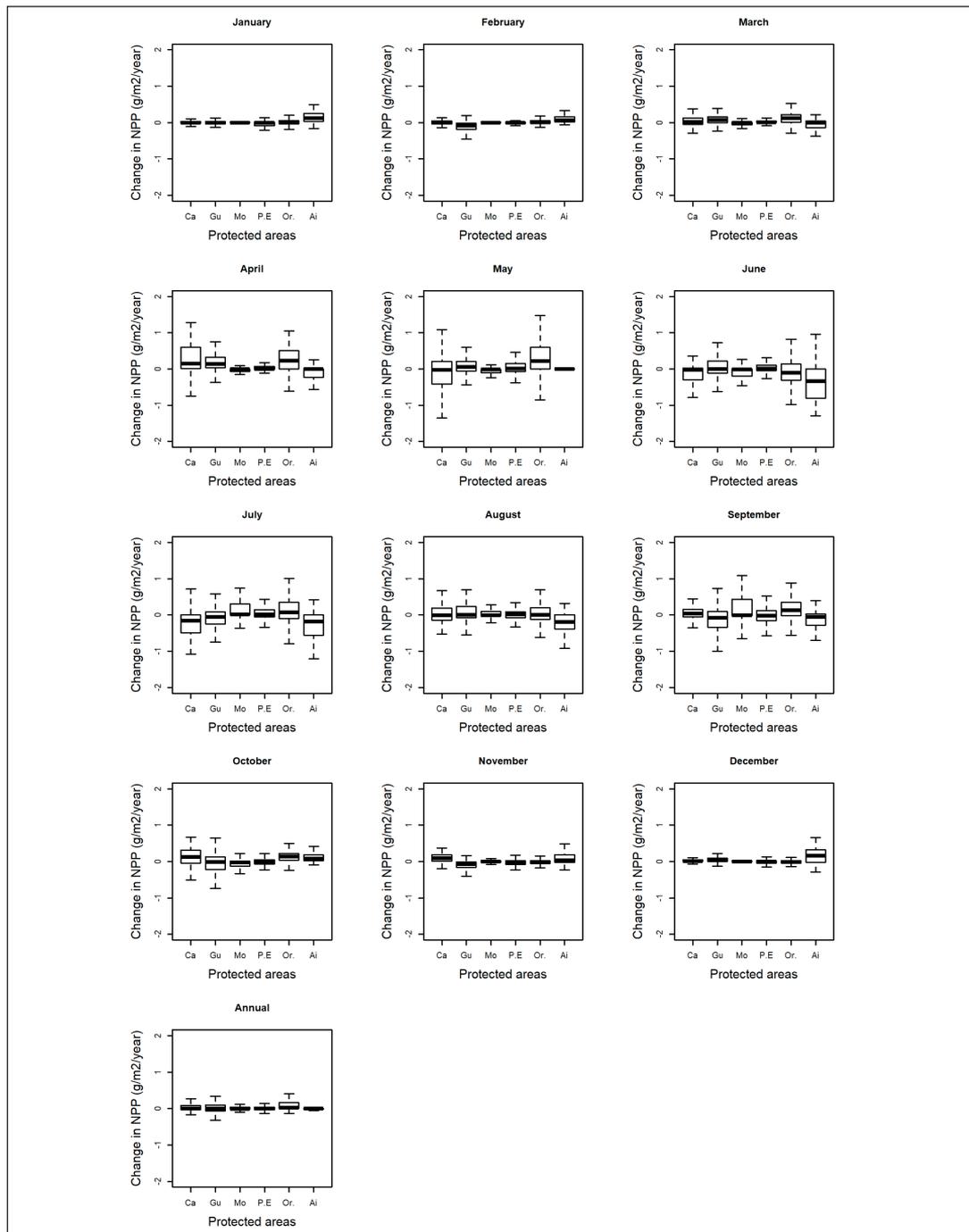


Figura 11. Diagramas de cajas sobre los cambios en la producción primaria neta en los diferentes parques analizados.
 Figure 11. Box-plots with the data of changes of net primary production in the different National Parks.

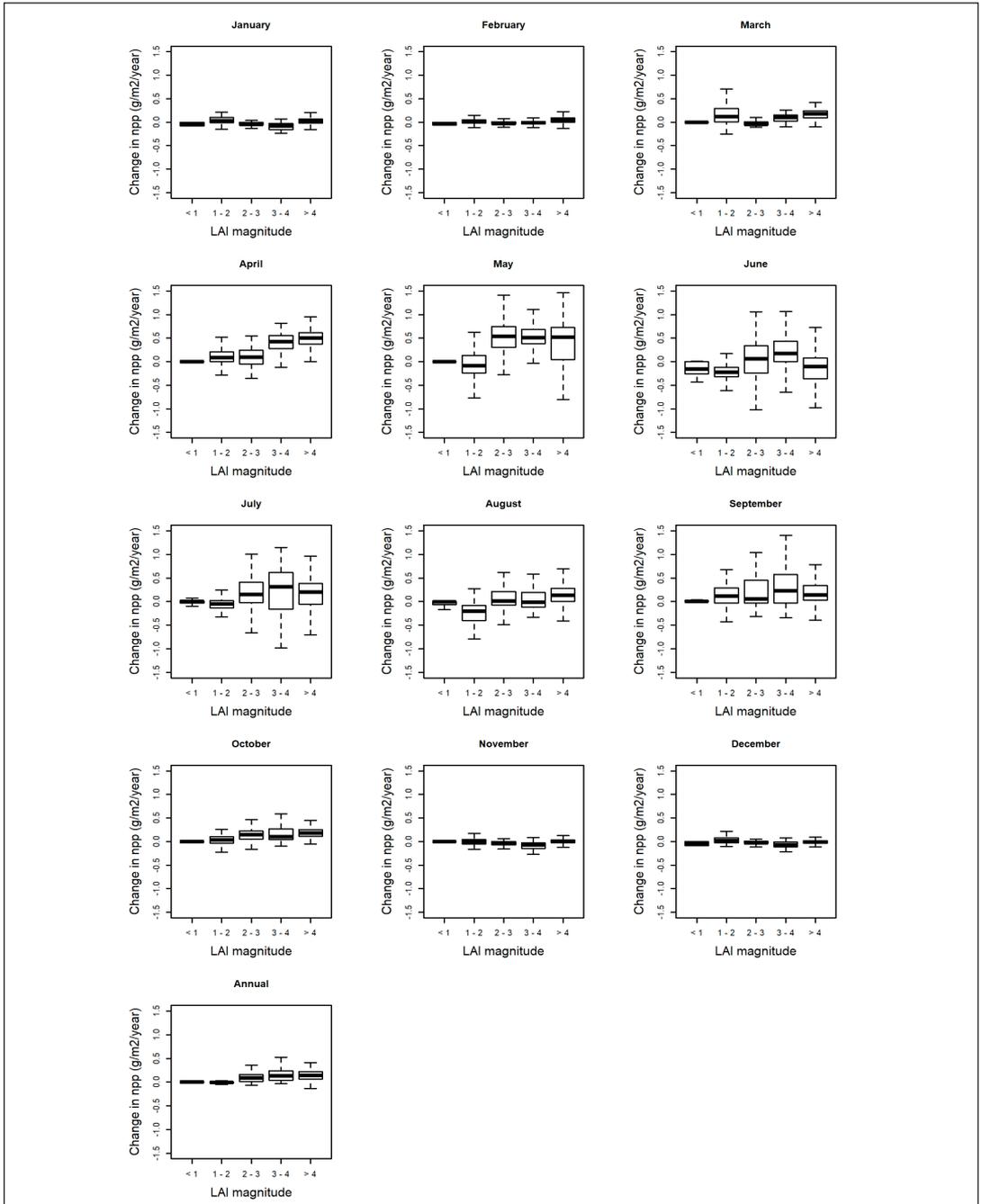


Figura 12. Diagramas de cajas con la magnitud de cambio de la producción primaria neta por categorías de densidad foliar en Ordesa y Monte Perdido.

Figure 12. Box-plots with the data of changes of net primary production for different categories of leaf density in Ordesa and Monte Perdido.

esta variable presenta una muy elevada variabilidad interanual.

Hay que señalar sin embargo, que los resultados obtenidos a partir del promedio de los diferentes parques están suavizando importantes cambios a nivel espacial y para diferentes características de la cubierta vegetal. Por ejemplo, en Monfragüe, aunque no se registran cambios en la NPP a nivel medio, si nos centramos en aquellas cubiertas menos densas, con un índice de área foliar medio inferior a 1, comprobamos que se produce un descenso de la NPP estadísticamente significativo, sobre todo entre 1990 y 2014. En general comprobamos que son aquellas cubiertas vegetales más densas, con una superficie foliar mayor, las que presentan un mayor incremento en el índice de área foliar, incluso en parques en los que de forma media no se detectaban cambios en esta variable (p.ej., Cabañeros). Llamativamente, en el parque de Picos de Europa se comprueba claramente este comportamiento mediante el índice de área foliar, pero también en Ordesa y Monte Perdido, mediante la producción primaria neta. Hay que destacar que este comportamiento detectado a partir de los promedios anuales también presenta múltiples variaciones a nivel estacional, de tal modo que estas divergencias en la magnitud de cambio en el LAI o la NPP entre diferentes densidades de cubierta se registra en meses concretos del año. Por ejemplo, en Ordesa y Monte Perdido existe un claro control de las tendencias en la producción primaria neta entre abril y agosto, determinado por la densidad de la cubierta vegetal, ya que en estos meses se comprueba claramente que los principales incrementos se registran en aquellas cubiertas más densas (Figura 12). Por el contrario, durante el invierno no se observa este comportamiento. No obstante, el comportamiento en estas zonas húmedas puede resultar muy diverso ya que en Picos de Europa y en el caso de la LAI, se comprueba que esta divergencia en las tendencias en función de la densidad vegetal se registra durante todos los meses del año (no mostrado). Monfragüe sería un ejemplo característico de una mayor complejidad ya que en Mayo y Junio la producción primaria neta desciende en mayor medida en las zonas más densas, mientras que entre Julio y Septiembre en esas mismas zonas se produce incremento dominante no registrado en las zonas de menor cobertura vegetal (no mostrado).

Hay que destacar que estas diferencias tanto entre parques, niveles de densidad de la cubierta y también de la estacionalidad, se manifiestan igualmente de forma espacial. Los mapas que reflejan las tendencias en las diferentes variables muestran importantes contrastes espaciales que vienen determinados por el diferente tipo de cubierta o densidad de la misma. Como ejemplo, la Figura 13 muestra el signo y significación de la tendencia en el LAI en los meses de mayo, agosto y también a escala anual en Guadarrama. En este parque se comprueba la existencia de manchas de vegetación cercanas con tendencias positivas o negativas. La Figura 14 muestra la distribución espacial de la magnitud de cambio del LAI durante los mismos periodos del año, donde también se comprueba que la magnitud de los cambios puede resultar muy contrastada desde una perspectiva espacial. En el caso de Guadarrama, aunque dominan las áreas caracterizadas por la estabilidad temporal, los procesos hidrológicos del suelo, controlados principalmente por la topografía y el tipo de suelo, además de la variabilidad y las tendencias climáticas y las características de la vegetación, hacen que haya zonas específicas en las que la simulación muestra un claro incremento del LAI, mientras que en otras pequeñas zonas se registra un descenso de esta variable.

Los resultados detallados sobre la variabilidad temporal y evolución de estas variables de actividad vegetal se pueden consultar en mayor detalle para cada uno de los parques y las diferentes comunidades vegetales en el visor de datos referido anteriormente.

DISCUSIÓN

Este trabajo ha permitido el desarrollo de una amplia base de datos que puede ser consultable de forma abierta y que aporta información sobre la evolución temporal de diferentes parámetros climáticos, de vegetación y de hidrología del suelo en los Parques Nacionales. La información presenta una razonable calidad al compararse con datos de actividad vegetal medidos mediante imágenes de satélite y datos de crecimiento secundario obtenido de muestreos dendrocronológicos. Además, los resultados se han traducido en el desarrollo de una

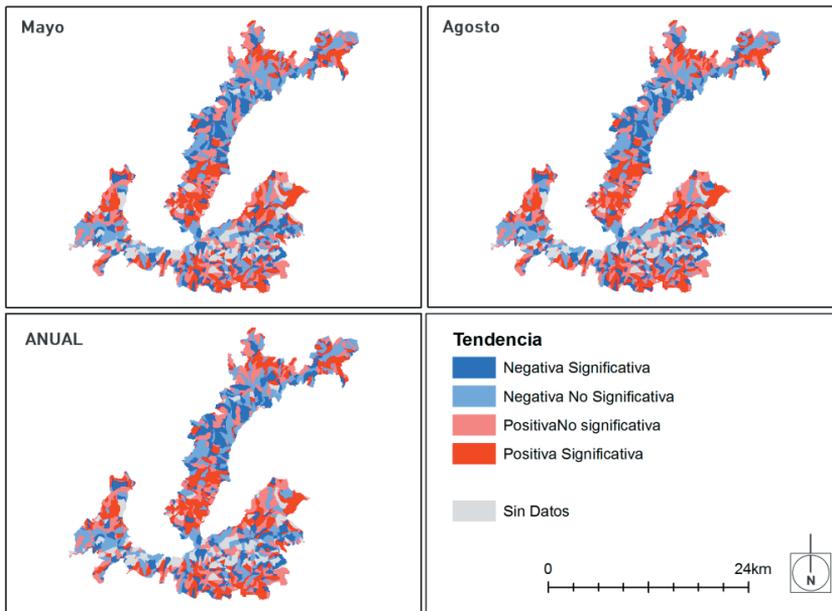


Figura 13. Distribución espacial del signo y significación de la tendencia en el LAI en mayo, agosto y a escala anual en Guadarrama.
Figure 13. Spatial distribution of the sign and significance of the trend of LAI in May, August and annual in Guadarrama.

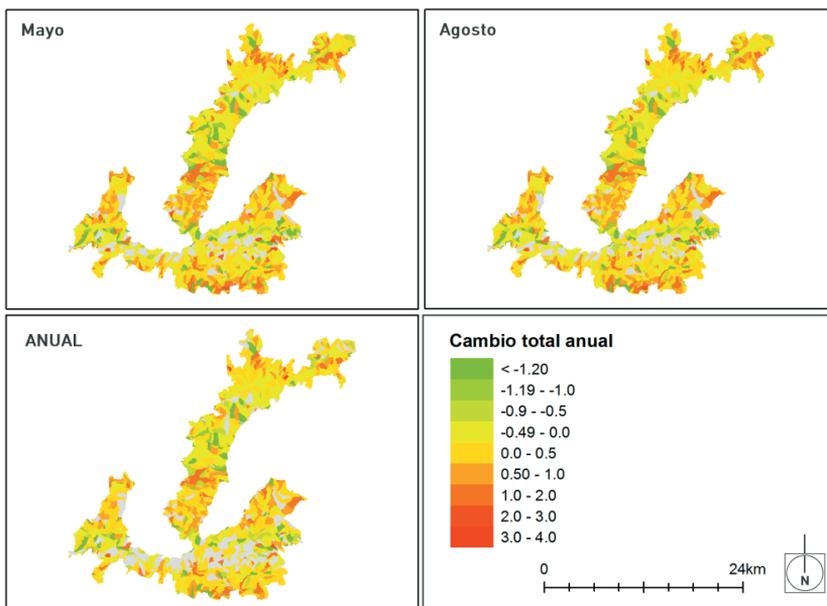


Figura 14. Distribución espacial de la magnitud de la tendencia en el LAI en mayo, agosto y a escala anual en Guadarrama.
Figure 14. Spatial distribution of the magnitude of change of LAI in May, August and annual in Guadarrama.

completa base de datos, que se incluye en un servidor web, en el que se puede descargar la evolución de las simulaciones obtenidas por partes del modelo RHESSys para las diferentes variables. El desarrollo del servidor de datos y la puesta a disposición pública de la información generada resultan de un importante valor añadido a los resultados obtenidos sobre la evolución y los cambios en el índice de área foliar y la producción primaria neta. La mayor tarea del proyecto ha sido pues el desarrollo de una amplia base de datos sobre variables climáticas, vegetales e hidrológicas en los siete Parques Nacionales continentales. Sin embargo, junto a ello hay que destacar que las bases de datos obtenidas han permitido caracterizar la variabilidad temporal y las tendencias de la cubierta vegetal en las últimas décadas, permitiendo determinar en qué medida las masas vegetales pueden estar viéndose afectadas por modificaciones en su actividad y crecimiento asociadas al actual escenario de cambio climático.

Los resultados han permitido la simulación de la cubierta vegetal en los diferentes Parques Nacionales a lo largo de las últimas décadas y la generación de escenarios de futuro de acuerdo a proyecciones de cambio climático. Los resultados obtenidos en el proyecto constatan la necesidad de llevar a cabo un seguimiento de las diferentes variables ambientales de actividad y crecimiento vegetal en los Parques Nacionales, siendo un desafío para los modelos demográficos de vegetación la simulación de precisión tanto de la productividad como de la composición de la comunidad vegetal (SHIKLOMANOV et al, 2020)

Se considera que la base de datos espacio-temporal desarrollada en este proyecto puede facilitar el diagnóstico de las masas forestales de los parques al permitir una cuantificación de su dinámica y la determinación de posibles cambios futuros.

Resulta complejo establecer recomendaciones específicas a partir de la base de datos desarrollada. En general, las simulaciones obtenidas sugieren que la vegetación de los diferentes parques no muestra cambios notables considerando dos parámetros de la cubierta (el índice de área foliar y la producción primaria neta), pero existen diferencias entre los parques, con un aumento en Picos de Europa y Ordesa y Monte Perdido y un descenso general del índice de área foliar en Aigües tTortes i Estany de Sant Maurici. Igualmente, existen diferencias espaciales principalmente condicionadas por el grado de densidad de la cubierta vegetal. Se comprueba que el principal incremento en el índice de área foliar o en la producción primaria neta se ha dado en las zonas de mayor área foliar. Por el contrario, los principales descensos se registran en zonas de escaso cubrimiento vegetal, aunque hay múltiples variaciones espaciales. Sería interesante plantear la monitorización de algunas de estas zonas para comprobar si realmente, y tal como indica el modelo de acuerdo a la evolución reciente del clima, se trata de zonas en las que puede existir algún tipo de riesgo que sugiera posibles intervenciones externas. Asimismo se antoja interesante la estimación precisa de la productividad de la vegetación para la investigación de los ecosistemas terrestres, los ciclos del carbono y el cambio climático (YU et al, 2018).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al proyecto ECOHIPRO (1560/2015): Herramientas de monitorización de la vegetación mediante modelización ecohidrológica en parques continentales: Evolución reciente y proyecciones futuras, financiado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, C. D., MACALADY, A. K., CHENCHOUNI, H., SEMERCI, A., COBB, N. A. (2010): . Global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259: 660-684.
- ANDEREGG W. R. L., ET AL. (2012). The roles of hydraulic and carbon stress in a widespread climate-induced forest die-off. *Proc Natl Acad Sci USA* 109(1): 233–237.
- BAND, L. E., TAGUE, C. L., BRUN, S. E., TENENBAUM, D. E., FERNANDES, R. A. (2000.) Modeling watersheds as spatial object hierarchies: structure and dynamics, *Transactions in GIS* 9(3): 181-196.
- BRESHEARS, D. D., ET AL. (2013). The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Frontiers in Plant Science*
- BRUNET, M., O. SALADIÉ, P. JONES, J. SIGRÓ, E. AGUILAR, A. MOBERG, D. LISTER, A. WALTHER, D. LOPEZ, AND C. ALMARZA. 2006. The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series (SDATS) (1850–2003). *International Journal of Climatology* 26: 1777–1802.
- CAMARERO, J. JULIO., ANTONIO GAZOL, GABRIEL SANGÜESA-BARREDA, JONÀS OLIVA AND VICENTE-SERRANO, S. M. (2015). To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology*. 103, 44-57
- CAMARERO, J. J., GAZOL, A., GALVÁN, J. D., SANGÜESA-BARREDA, G., GUTIÉRREZ, E. 2015b. Disparate effects of global-change drivers on mountain conifer forests: Warming-induced growth enhancement in young trees vs. CO₂ fertilization in old trees from wet sites. *Global Change Biology* 21: 738-749.
- CAMARERO, J. J., GUTIÉRREZ, E. 2004. Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees *Climatic Change* 63 (1-2): 181-200
- CARNICER, J., COLL, M., NINYEROLA, M., PONS, X., SÁNCHEZ, G., PEÑUELAS, J. 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Jan 2011, 108 (4) 1474-1478; DOI: 10.1073/pnas.1010070108
- CHAVES MANUELA M., MAROCO JOÃO P. PEREIRA JOÃO S. (2003). Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology* 30, 239-264.
- CLIFFORD, M. J., ROYER, P. D., COBB, N. S., BRESHEARS, D. D., FORD, P. L. (2013):. Precipitation thresholds and drought-induced tree die-off: Insights from patterns of *Pinus edulis* mortality along an environmental stress gradient, *New Phytologist* 200: 413-421
- COOK, BENJAMIN I, SMERDON, JASON E, SEAGER, RICHARD, AND COATS, SLOAN. 2014. “Global Warming and 21st Century Drying.” *Climate Dynamics* 43.9-10 (2014): 2607-627. Web.
- EL KENAWY, A., LÓPEZ-MORENO, J. I. AND VICENTE-SERRANO, S. M. (2011). Recent changes in daily temperature extremes in Northeastern Spain (1960-2006). *Natural Hazards and Earth System Science* 11: 2583-2603.
- GIBELIN, A.-L. AND DÉQUÉ, M. 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics* 20: 327–339.
- GIORGI, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33: L08707.
- González-Hidalgo, J. C., M. Brunetti & M. De Luis. 2011. A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (Monthly precipitation trends December 1945–November 2005). *International Journal of Climatology* 31: 715–731.
- JONES, P. D., LISTER, D. H., OSBORN, T. J., HARPHAM, C., SALMON, M., MORICE, C. P. (2012). Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 117 (5), art. no. D05127.
- LÉVESQUE, M., SIEGWOLF, R., SAURER, M., EILMANN, B., RIGLING, A., 2014. Increased water-use efficiency does not lead to enhanced tree growth under xeric and mesic conditions. *New Phytol.* 203, 94–109.
- LINARES, J. C., CAMARERO, J. J. 2012. Growth patterns and sensitivity to climate predict silver fir decline in the Spanish Pyrenees. *European Journal of Forest Research* 131 (4): 1001-1012.
- LLORET, F., LOBO, A., ESTEVAN, H., MAISONGRANDE, P., VAYREDA, J., TERRADAS, J. 2007. Woody plant richness and NDVI response to drought events in Catalanian (northeastern Spain) forests. *Ecology* 88 (9): 2270-2279
- MARTÍNEZ-VILLALTA, J., LÓPEZ, B. C., ADELL, N., BADIELLA, L., NINYEROLA, M., 2008. Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions. *Global Change Biology* 14: 2868–2881.
- MCDOWELL, N., POCKMAN, W. T., ALLEN, C. D., WILLIAMS, D. G., YEPEZ, E. A. (2008.): Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178: 719-739
- MCVICAR, T. R., RODERICK, M. L., DONOHUE, R. J., ET AL. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology* 416-417: 182-205.

- OSBORNE, C. P., MITCHELL, P. L., SHEEHY, J. E. AND WOODWARD, F. I. (2000.), Modelling the recent historical impacts of atmospheric CO₂ and climate change on Mediterranean vegetation. *Global Change Biology*, 6: 445-458. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00336.x>
- PASHO, E., J. JULIO CAMARERO, MARTÍN DE LUIS & VICENTE-SERRANO, S. M. (2011). Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151: 1800-1811.
- SANCHEZ-LORENZO, A.; CALBO, J.; BRUNETTI, M. AND DESER, C. (2009). Dimming/brightening over the Iberian Peninsula: Trends in sunshine duration and cloud cover, and their relations with atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 114, D00D09, doi:10.1029/2008JD011394.
- SÁNCHEZ-SALGUERO, R., NAVARRO-CERRILLO, R. M., CAMARERO, J. J., FERNÁNDEZ-CANCIO, Á. 2012. Selective drought-induced decline of pine species in southeastern Spain. *Climatic Change* 113 (3-4): 767-785
- SHIKLOMANOV, A. N., BOND-LAMBERTY, B., ATKINS, J. W, AND GOUGH, C. M. 2020. "Structure and Parameter Uncertainty in Centennial Projections of Forest Community Structure and Carbon Cycling." *Global Change Biology* 26.11 (2020): 6080-096.
- SIMMONS, A. J., WILLETT, K. M., JONES, P. D., THORNE, P. W., DEE, D. P. (2010).: Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 115, art. no. D01110.
- SMITH S. D., ET AL. (2000) Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature* 408(6808): 79–82.
- TAGUE, C. & BAND, L. (2004). RHESys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System: An object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water and nutrient cycling. *Earth Interactions* 8: 1-42.
- TAGUE, C. (2009). Modelling hydrologic controls on denitrification: sensitivity to parameter uncertainty and landscape representation. *Biogeochemistry* 93: 79-90.
- VICENTE-SERRANO, S. M., ET AL. (2019). Vegetation greening in Spain detected from long term data (1981–2015). *International Journal of Remote Sensing* 41 (5): 1709-1740.
- VICENTE-SERRANO, S. M. (2007). Evaluating The Impact Of Drought Using Remote Sensing In A Mediterranean, Semi-Arid Region, *Natural Hazards*, 40: 173-208.
- VICENTE-SERRANO, S. M. (2006). Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910-2000). *Hydrological Sciences Journal*. 51: 83-97.
- VICENTE-SERRANO, S. M., AZORIN-MOLINA, C., SANCHEZ-LORENZO, A., MORÁN-TEJEDA, E., LORENZO-LACRUZ, J. REVUELTO, J., LÓPEZ-MORENO, J. I., ESPEJO, F. (2014). Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms. *Climate Dynamics*. 42:2655–2674
- VICENTE-SERRANO, S. M., CAMARERO, J. J., ZABALZA, J., SANGÜESA-BARREDA, G, LÓPEZ-MORENO, J. I. AND TAGUE, C. L. (2015.) The evapotranspiration deficit controls growth and net primary production: implications for Pyrenean silver fir growth under warmer and drier conditions. *Agricultural and Forest METEOROLOGY*. 206: 45-54.
- VICENTE-SERRANO, S. M., CESAR AZORIN-MOLINA, ARTURO SANCHEZ-LORENZO, JESÚS REVUELTO, JUAN I. LÓPEZ-MORENO, JOSÉ C. GONZÁLEZ-HIDALGO, FRANCISCO ESPEJO. (2014b) Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961–2011. *Global and Planetary Change*, 121: 26-40.
- VICENTE-SERRANO, S. M., GOUVEIA, C., CAMARERO, J. J., BEGUERÍA, S., TRIGO, R., LÓPEZ-MORENO, J. I., AZORÍN-MOLINA, C., PASHO, E., LORENZO-LACRUZ, J., REVUELTO, J., MORÁN-TEJEDA, E. & SANCHEZ-LORENZO, A. (2013). The response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 52-57.
- VICENTE-SERRANO, S. M., LASANTA, T., GRACIA, C. (2010). Aridification determines changes in leaf activity in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 614-628.
- VICENTE-SERRANO, S. M., ZOUBER, A., LASANTA, T. & PUEYO, Y. (2012). Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid Mediterranean environments. *Ecological Monographs*, 82: 407-428.
- WANG, K., DICKINSON, R. E., SHUNLIN LIANG,. (2012). Global Atmospheric Evaporative Demand over Land from 1973 to 2008. *J. Climate*, 25: 8353–8361.
- WEISS, M., M. FLORKE, L. MENZEL & J. ALCAMO. 2007. Model based scenarios of Mediterranean droughts. *Advances in Geosciences* 12: 145–151.