

FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS DE LA RED DE PARQUES NACIONALES DE ESPAÑA: DETECCIÓN DE IMPACTOS RECIENTES Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y ALERTA A PARTIR DE HERRAMIENTAS DE TELEDETECCIÓN

JAVIER CABELLO¹, DOMINGO ALCARAZ-SEGURA^{1,2} Y PATRICIA LOURENÇO¹

RESUMEN

El desarrollo de programas de seguimiento que permitan una rápida evaluación de las condiciones de las áreas protegidas frente a los efectos del cambio global representa un reto para la Ecología. Para aumentar su eficiencia, este tipo de programas deben considerar un conjunto de principios relacionados con la naturaleza de los indicadores, su capacidad para detectar cambios y, la escala temporal y espacial a la que pueden ser interpretados. El uso de la teledetección contribuye a satisfacer estos requisitos, ya que a partir de índices espectrales relacionados con el intercambio de materia y energía entre la vegetación y la atmósfera, se pueden derivar atributos que informan sobre la integridad de los ecosistemas a escala regional y a través de largas series temporales. A lo largo del proyecto «Efectos del cambio global sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la Red de Parques Nacionales Españoles: impactos recientes y desarrollo de un sistema de seguimiento», hemos progresado en las bases conceptuales y metodológicas necesarias para el desarrollo de un programa de seguimiento basado en el empleo de dichos atributos funcionales que permita evaluar las tendencias y anomalías que sufren los ecosistemas de la Red. Para ello comenzamos evaluando los parques de la Península ibérica con imágenes de resolución grosera y largas series temporales (AVHRR). A pesar de la variabilidad observada en la repuesta de los atributos funcionales a lo largo de los diferentes parques, encontramos un patrón claro en las condiciones de referencia de éstos en función de la región biogeográfica a la que pertenecen, y detectamos cambios importantes en su productividad, estacionalidad y fenología en los últimos 25 años. A partir de la experiencia acumulada, y gracias a la disponibilidad de imágenes de mayor resolución espacial y frecuencia temporal (MODIS) proponemos un sistema de seguimiento y alerta que permitirá proporcionar datos de forma periódica, sistemática y homogénea del estado de los ecosistemas mediante una metodología estandarizada para cualquier zona del planeta.

Palabras clave: AVHRR, atributos funcionales, condiciones de referencia, índices espectrales de vegetación, MODIS, tendencias.

¹ Departamento Biología Vegetal y Ecología. Centro Andaluz para la Evaluación y Seguimiento del Cambio Global, Universidad de Almería. Ctra. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, Almería, E-04120, España. jcabello@ual.es

² Dpto. Botánica. Universidad de Granada. Facultad de Ciencias, Planta 6 Sección de Biología. Campus Universitario de Fuentenueva. Universidad de Granada. 18071. Granada.

SUMMARY

Nowadays, in relation to the effects of global change, the science of ecology faces the challenge of developing monitoring programs that allow a quick assessment of the conditions of the protected areas. To increase the efficiency of such programs, we should consider a set of principles regarding the nature of the indicators, their ability to detect changes, and the temporal and spatial scales at which they can be interpreted. The use of satellite-derived indices contributes to satisfy these requirements, since they report the integrity of ecosystems at regional scale and through long time series. Throughout the Project "Effects of global change on ecosystem functioning of the Spanish National Park Network: recent impacts and developing of a monitoring system", we progressed in the conceptual and methodological grounds needed to develop a monitoring program based on the use of satellite-derived functional attributes, to assess trends and anomalies in the ecosystems of Spanish National Parks Network. First, we started assessing the ecosystem functioning of the Iberian Peninsula parks through the use of coarse spatial resolution and long time series images (AVHRR sensor). In spite of the observed variability in the functional attributes response along the parks, we found two clear patterns in the reference conditions of the parks according to the biogeographic region they belong to. In addition, we detected significant changes in the productivity, seasonality and phenology of ecosystems of the Network in the last 25 years. Second, thanks to the availability of images of higher spatial resolution and temporal frequency (MODIS sensor), we propose a monitoring and early warning system that will provide periodic, systematic and homogeneous data of ecosystem using a standardized methodology for any part of the Earth.

Key word: AVHRR, baseline conditions, functional attributes, MODIS, spectral vegetation indices, trends.

INTRODUCCIÓN

Para conocer cómo están cambiando las áreas protegidas ante el impacto del cambio global, debemos afrontar el reto de dotar a los gestores de dichas áreas de programas de seguimiento que permitan una rápida evaluación de los efectos de los cambios ambientales y de las condiciones de los ecosistemas que albergan (YAFFEE, 1999; LUDWIG y otros, 2004). Aunque este tipo de programas comienzan a proliferar, su diseño no resulta sencillo, ya que para aumentar su eficiencia deben considerar un conjunto de principios básicos relacionados con la naturaleza de los indicadores que usen, su capacidad para detectar cambios y la escala temporal y espacial a la que deben ser implementados (COSTANZA y otros, 1992; GRUMBINE, 1994; ZORN y otros, 2001; LUDWIG y otros, 2004).

Un primer requisito de éstos programas es que incorporen variables que puedan ser registradas

a nivel ecosistémico, sobre grandes áreas y en tiempo real. Este tipo de variables son especialmente adecuadas por que ofrecen una visión holística del estado de los ecosistemas, y son fácilmente vinculables a los conceptos de salud e integridad ecosistémica. A pesar de la ambigüedad de estos conceptos, su tratamiento resulta ineludible ya que están ampliamente incorporados a la normativa ambiental, y son muy intuitivos para los ciudadanos. En segundo lugar, los indicadores de seguimiento deben tener un tiempo de respuesta suficientemente corto como para permitir el manejo y seguimiento adaptativo (LINDEMAYER & LIKENS, 2010) y la detección temprana de los impactos. Tercero, el establecimiento de condiciones de referencia y su rango de variabilidad, frente a las que evaluar los cambios que sufren los ecosistemas, representa un aspecto clave para la evaluación del estado de éstos (JAX, 2010). Por ello, los indicadores que se usen deben permitir la definición de dichas condiciones a partir de un estado o sistema similar

(a menudo asumido como "natural"), mediante el uso de datos históricos o a través de procesos de modelización.

Por otro lado, un problema en el estudio de los impactos del cambio global sobre los ecosistemas es la escala a la que operan los agentes de cambio y sus efectos exceden a la de las parcelas o situaciones experimentales clásicas. Para solventar este aspecto, conviene incorporar una perspectiva regional al seguimiento, ya que esta escala permite una mayor aplicabilidad y grado de inferencia (BEEVER & WOODWARD, 2011). A través de evaluaciones regionales es más fácil distinguir entre anomalías locales y regionales, detectar tendencias, identificar umbrales de cambio y dinámicas no lineales, aspectos que resultan especialmente importantes en relación con el cambio climático.

El avance de tecnologías como la teledetección puede contribuir de gran manera al uso de indicadores que atiendan a las necesidades expuestas. De hecho, el estudio mediante teledetección del funcionamiento de los ecosistemas (i.e. el intercambio de materia y energía entre la biota y la atmósfera) añade algunas ventajas al uso tradicional de atributos estructurales de la biodiversidad (e.g. especies o tipos de vegetación) o al de subrogados ambientales (e.g. bioclimas). En este sentido, el empleo de atributos relacionados con el intercambio de materia y energía entre la vegetación y la atmósfera, ofrece una respuesta a más corto plazo que la estructura de la vegetación, lo que impide que la inercia en el mantenimiento de ésta frente a las perturbaciones pueda retrasar la percepción de los efectos sobre los ecosistemas (PENNINGTON, 1986; MILCHUNAS y LAUENROTH, 1995; MYNENI y otros, 1997). Además, este tipo de atributos permiten caracterizar cualitativa y cuantitativamente los servicios ecosistémicos de un territorio (DAILY, 1997; COSTANZA y otros, 1997) y se prestan a seguimiento a través del empleo de imágenes de satélite con mayor facilidad que los estructurales (MALINGREAU, 1986), lo que también proporciona una caracterización dinámica de los ecosistemas. La incorporación de este tipo de información funcional resulta vital en el manejo

ecosistémico de los recursos, en la planificación sistemática de la conservación (MARGULES y PRESSEY, 2000) y, más aun si cabe, en el desarrollo de estrategias de conservación que integren los efectos del cambio global (e.g. HALPIN, 1997; HANNAH y otros, 2002; ARAÚJO y otros, 2004).

Existen índices espectrales derivados de sensores remotos que están conectados con variables funcionales de los ecosistemas tales como la productividad primaria neta, la evapotranspiración, la temperatura superficial o el albedo (DI BELLA y otros, 2000; LIANG, 2000; RUNNING y otros, 2000). Entre los más importantes se encuentran los índices de vegetación (IV) como el NDVI (por sus siglas en inglés, Normalized Difference Vegetation Index) y el EVI (Enhanced Vegetation Index). Éstos índices representan estimadores lineales de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fPAR) (WANG y otros, 2004), el principal control de las ganancias de carbono (MONTEITH & WEBB, 1981) (Figura 1). Además, han sido satisfactoriamente empleados para describir los patrones regionales de la productividad primaria neta (POTTER y otros, 1993; PARUELO y otros, 1997), el descriptor más integrador del funcionamiento ecosistémico (McNAUGHTON y otros, 1989; VIRGINIA y WALL, 2001). Las investigaciones ecológicas basadas en éstos índices constituyen una valiosa aproximación en biología de la conservación (TURNER y otros, 2003; CABELLO y otros 2012b), como apoyo al manejo de la naturaleza (PELKEY y otros, 2003), y en el estudio de las respuestas ecológicas frente a los cambios ambientales (PETTORELLI y otros, 2005).

De acuerdo con estos principios, en el proyecto titulado «Efectos del cambio global sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la Red de Parques Nacionales Españoles: impactos recientes y desarrollo de un sistema de seguimiento», nos planteamos la realización de investigaciones y avances técnicos que nos permitieran sentar las bases conceptuales y metodológicas para dotar a la Red de Parques Nacionales de un sistema de seguimiento y alerta (SSA) que permita evaluar las tendencias a largo plazo y detectar anomalías espaciales y temporales en el funcionamiento de

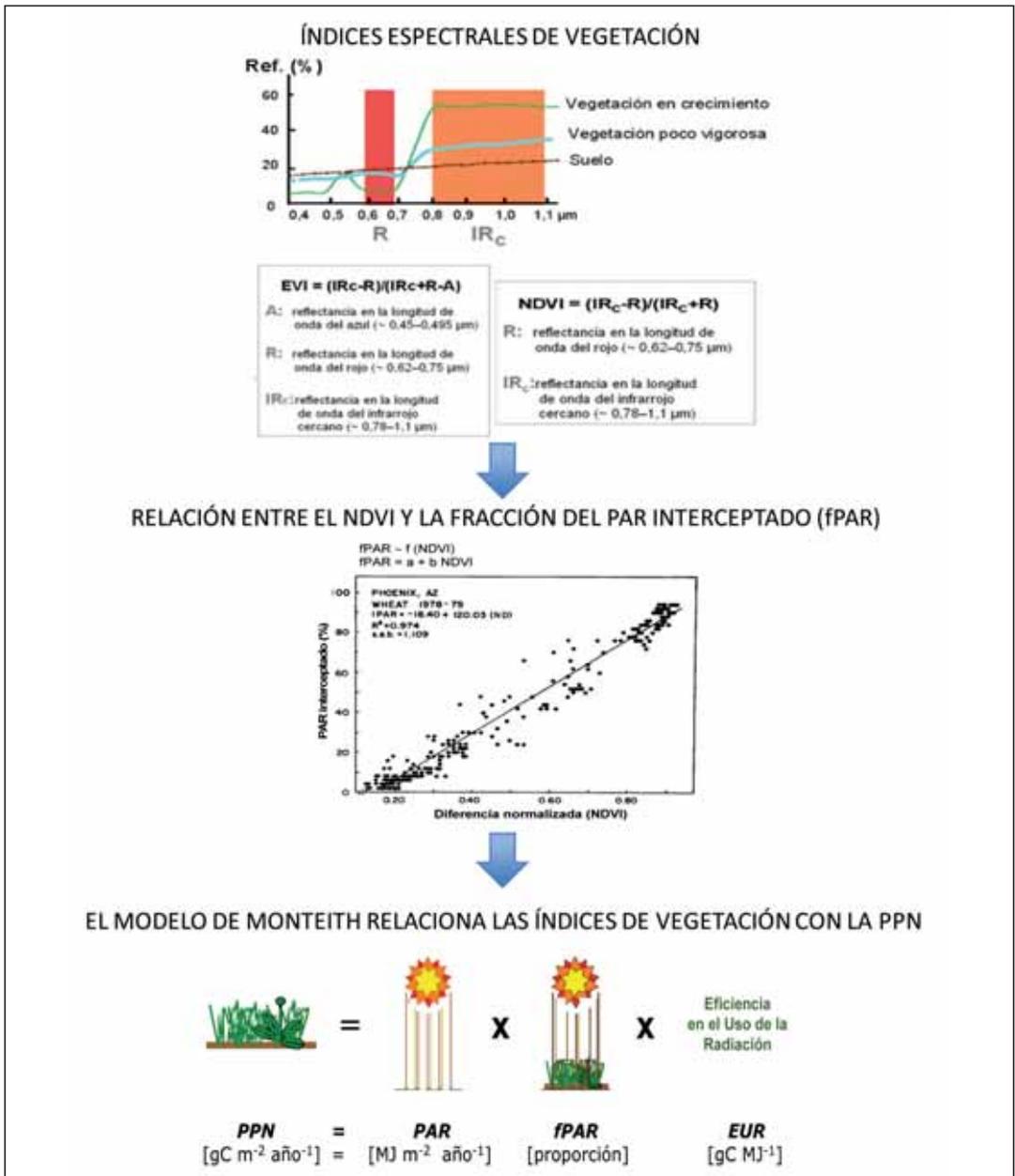


Figura 1. La diferente absorción de radiación que la vegetación presenta en las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano permite la estimación de índices de vegetación espectrales que muestran una relación directa con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fPAR), un parámetro que determina la productividad primaria neta, considerada como el descriptor más integrador del funcionamiento ecosistémico.

Figure 1. The differences in the patterns of absorption of red and nearinfrared wavelengths by the vegetation allow the estimation of spectral vegetation indices. These indices show a direct relation with the fraction of photosynthetically active radiation intercept by vegetation (fPAR), a parameter that determines the net primary production, and which is considered the more integrative descriptor of ecosystem functioning.

los ecosistemas a través del empleo de IV y los indicadores de la productividad, estacionalidad y fenología derivados. A lo largo del proyecto, nos planteamos una primera etapa para la adquisición de conocimiento en relación a las condiciones de referencia del funcionamiento de los parques nacionales españoles y sus controles ambientales y, la identificación de tendencias de cambio direccionales derivadas de los efectos recientes del cambio global y del manejo de los parques. Posteriormente, a partir de la metodología empleada desarrollamos una propuesta de SSA basado en el análisis del funcionamiento ecosistémico y válido para toda la Red de Parques Nacionales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Bases de datos de imágenes de satélite utilizadas

El desarrollo conceptual y operacional de un sistema de seguimiento basado en imágenes de satélite debe tener en cuenta las variables biofísicas que se pretenden monitorear, los productos satelitales disponibles y el papel que puede jugar cada uno de ellos dentro del sistema en función de sus características (i.e. su resolución espacial, temporal, y espectral, y el periodo de tiempo cubierto). El sistema presentado en este trabajo está basado en el empleo de IV, aunque ha sido diseñado para su ampliación con más variables biofísicas (temperatura superficial, albedo, evapotranspiración, etc.) en el futuro. La selección de éstos IV (NDVI /EVI) como base del sistema de seguimiento se justifica por ser estimadores de la producción primaria. Los IV están basados en la propiedad espectral de la vegetación verde de absorber diferencialmente la radiación fotosintéticamente activa. El NDVI calcula la diferencia normalizada de la reflectancia entre dos longitudes de onda relacionadas con el proceso de la fotosíntesis (rojo e infrarrojo cercano), mientras que el EVI incorpora, además, una tercera longitud de onda (azul) que minimiza la influencia del suelo y la atmósfera.

Los sensores satelitales más utilizados para el seguimiento de IV a escala global y regional son

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Estos sensores proveen imágenes totalmente gratuitas que responden a diferentes series temporales, por lo que aunque las imágenes del sensor AVHRR son de menos detalle, su uso es adecuado dado que están disponibles desde principios de los 80. A lo largo del proyecto las imágenes que usamos fueron las siguientes:

a) Para la caracterización de las condiciones de referencia y la identificación de las tendencias de cambio, empleamos dos bases de datos del NDVI procedentes de imágenes del sensor AVHRR. En concreto usamos los productos desarrollados por el grupo GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms>, TUCKER y otros 2005) y por el grupo LTDR (Land Long Term Data Record, <http://ltdr.nascom.nasa.gov>) respectivamente. Una revisión y comparación detallada de ambos productos puede encontrarse en ALCARAZ-SEGURA y otros (2010). El producto GIMMS tiene una resolución espacial de 8 km y temporal de 15 días, y cubre el periodo 1981-2006. El producto LTDR versión 3 tiene una resolución espacial de 4 km y temporal de 1 día (aunque para el sistema se construyeron compuestos cada 15 días) y cubre el periodo 1981-1999. Como ventaja, ambos productos comienzan en 1981 y como inconvenientes, ambos tienen una resolución espacial grosera (aunque algo más detallada en LTDR) y ninguno es operacional, es decir, no se producen de forma sistemática hasta el presente, siendo necesario esperar varios años hasta que los grupos que los desarrollan los actualicen con las imágenes más recientes. Por este motivo, sólo forman parte del sistema de seguimiento y no del de alerta. Ambos productos fueron usados por su idoneidad para evaluar las tendencias de largo plazo a nivel de parque para toda la red (ALCARAZ-SEGURA y otros 2009a y b, ALCARAZ-SEGURA y otros 2008a), aunque también nos permitieron obtener estimaciones groseras de las condiciones de referencia de los parques y de las tendencias a nivel de ecosistema (ALCARAZ-SEGURA y otros 2008b).

b) Para el desarrollo del SSA nos basamos en las imágenes del sensor MODIS. En concreto, hemos usado el producto MOD13Q1 que dispone del NDVI y del EVI. MOD13Q1 tiene una resolución espacial aproximada de 230 metros y temporal de 16 días. Gracias a su alta resolución espacial, este producto resulta idóneo para establecer las condiciones de referencia y el sistema de seguimiento a nivel de ecosistema dentro de los parques. Además, al ser un producto operacional que proporciona sistemáticamente una imagen actualizada cada 16 días, lo proponemos como núcleo del sistema de alerta. Un inconveniente es que sólo está disponible desde febrero de 2000 hasta la actualidad, por lo que las evaluaciones de las tendencias de largo plazo ocurridas antes del año 2000 deben hacerse con AVHRR (de menor resolución espacial).

Indicadores del funcionamiento de los ecosistemas, caracterización de condiciones de referencia y evaluación de tendencias

Los indicadores funcionales que usamos se derivan de la parametrización de las curvas anuales que obtenemos a partir de la serie temporal de imágenes de IV. Puesto que dichas curvas se construyen a partir de toda la serie temporal, se puede decir que resumen la variabilidad temporal del funcionamiento de los ecosistemas. La tabla 1 y la figura 2 muestran los indicadores más sencillos de obtener, que capturan la máxima variabilidad contenida en la serie temporal y que presentan un claro significado ecológico: Media anual, Coeficiente de variación estacional (o rango relativo intra-anual), valores Máximo y Mínimo anuales, y Momentos del año en el que ocurrieron el Má-

Atributo	Tipo de medida	Definición	Significado biológico	Comentarios
NDVI-I	Productividad total y biomasa	Suma de valores positivos de NDVI en un período de tiempo	Productividad anual de la vegetación	No es relevante cuando la calidad es tan importante como la cantidad (e.g. herbívoros muy selectivos)
Máximo NDVI	Productividad total y biomasa	Máximo NDVI en el año	Productividad anual de la vegetación	Sensible a falsos picos y «ruido»
Rango relativo de NDVI	Variabilidad intra-anual en productividad	(Máximo NDVI - Mínimo NDVI) / NDVI-I	Permite comparaciones de estacionalidad	Sensible a falsos rangos debidos a «outliers»
Tasa de incremento o detrimento de NDVI	Fenología	Pendiente entre valores de NDVI en diferentes fechas. Pendiente de la curva logística de una serie temporal de valores de NDVI	Tasa de brotado y senescencia	Sensible a falsos picos y «ruido»
Fecha de comienzo o final de estación de crecimiento	Fenología	Fechas estimadas a partir de valores umbral o con el método de medias móviles	Comienzo de brotado	La precisión esta ligada a la escala temporal de los datos (mayor frecuencia supone peor calidad de datos)
Duración de la estación de crecimiento	Fenología	Tiempo con valores de NDVI > 0 o período entre inicio y final de estación de crecimiento	En sistemas con marcada estacionalidad, número de días con producción de biomasa	Sensible a falsos picos y «ruido»
Momento de máximo NDVI	Fenología	Fecha en la que se registra el valor máximo de NDVI	Momento de máxima producción de materia seca	Sensible a falsos picos y «ruido»

Tabla 1. Atributos derivados de la curva estacional de los índices espectrales de vegetación (NDVI y EV) y sus características. Adaptado de PETTORELLI y col. (2005).

Table 1. Attributes derived from the seasonal curve of vegetation spectral indices (NDVI and EVI) and their main characteristics. Adapted from PETTORELLI et al. (2005).

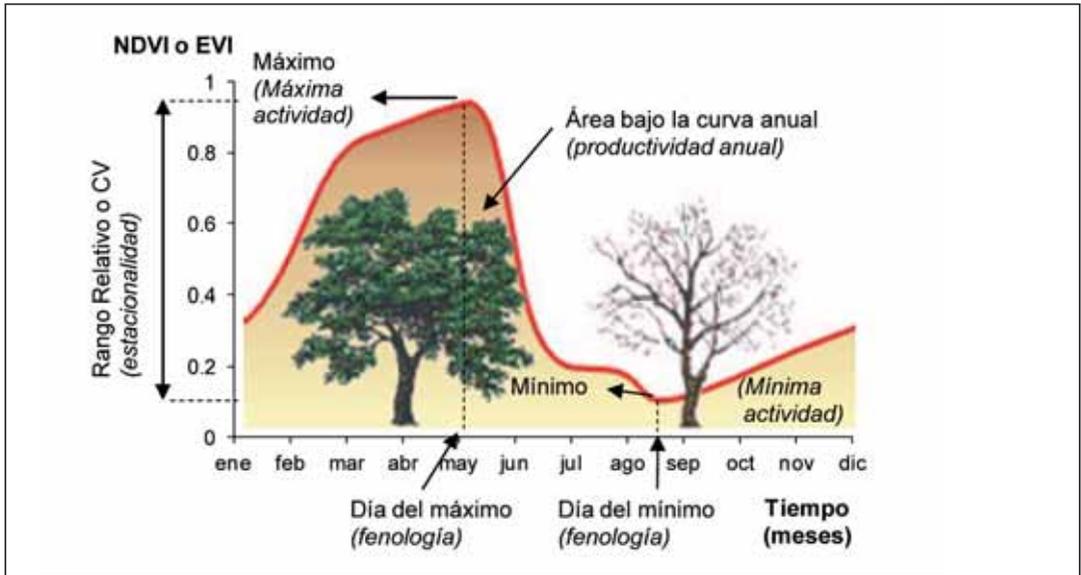


Figura 2. Curva anual del índice espectral de vegetación (NDVI o EVI) y sus descriptores funcionales derivados. El uso de estos descriptores como indicadores y su significado biológico están ampliamente reconocidos (PETTORELLI et al., 2005). Modificado de G. Baldi, Iniciativa Lechusa (lechusa.unsl.edu.ar).

Figure 2. Derived functional descriptors from the annual mean curve of vegetation spectral indices (NDVI or EVI). The use of such descriptors and their biological meaning are widely recognized as indicators (PETTORELLI et al., 2005). Modified image from G. Baldi, Lechusa initiative (lechusa.unsl.edu.ar).

ximo y el Mínimo. Estos indicadores nos permitieron monitorear múltiples aspectos clave relacionados con la productividad primaria, estacionalidad y fenología de los ecosistemas a través de amplios territorios (ALCARAZ-SEGURA y otros 2009a) y aplicando una metodología que ha sido usada en otras regiones del planeta. Estos indicadores constituyen la base del SSA propuesto.

Para conocer cómo están cambiando los parques, analizamos las tendencias en los indicadores de productividad, estacionalidad y fenología de los ecosistemas mediante el test no-paramétrico de Mann-Kendall (véase ALCARAZ-SEGURA y otros 2010) que tiene la ventaja de ser robusto ante la distribución no normal de los datos, la existencia de huecos y la autocorrelación temporal. Este test no-paramétrico, basado en rangos, calcula la tendencia monótona considerando el número de veces que un año en particular presenta un valor mayor o menor que cualquiera de los años anteriores. Este test también se empleó para evaluar tendencias en cada una de las 23 fe-

chas (compuestos) de la curva anual obtenida a partir de imágenes MODIS, por lo que lo proponemos en el SSA para evaluar la existencia de cambios concentrados en una determinada estación del año que pueden no afectar a los indicadores funcionales anteriores. Estos métodos han demostrado ser poderosos en análisis preliminares a escala grosera sobre la península Ibérica y Sudamérica. Adicionalmente, empleamos la versión estacional del test de Mann-Kendall para evaluar la tendencia en el conjunto de la serie temporal del IV. Esta versión permite detectar tendencias significativas en el índice de vegetación aún cuando sólo se producen pequeñas tendencias en cada una de los compuestos.

Diseño y características básicas de la propuesta de sistema de seguimiento y alerta

La disponibilidad periódica de imágenes MODIS nos permitió diseñar un prototipo de SSA (Monparq) que fue ensayado en Sierra Nevada, y que

posteriormente refinamos y actualizamos a través del empleo de rutinas para el procesamiento de las imágenes basadas en el empleo de software libre y de código abierto. El SSA está basado, por tanto, en la evaluación de porciones de territorio coincidentes con píxeles de imágenes satelitales de resolución espacial media (230 m), alta frecuencia temporal (16 días), y una serie histórica que comienza en el año 2000, por lo que permitirá identificar tendencias, anomalías temporales y anomalías espaciales en los ecosistemas.

Para atender a los requerimientos de los sistemas de seguimiento adaptativo (LINDEMAYER & LIKENS, 2010), el SSA considera tres aspectos fundamentales en el análisis y tratamiento de datos ambientales: 1) estar orientado hacia la gestión; 2) ser concebido como una herramienta dinámica susceptible de ser mejorada continuamente; y 3) contar con un flujo transparente de trabajo. De esta forma se planteó como punto de

partida la formulación de cuestiones centrales relativas a la detección de cambios en los ecosistemas, a las que debería atender el sistema (tabla 2), y los productos que permitieran visualizar las respuestas correspondientes. El SSA proporciona de esta manera información útil para la priorización de las actuaciones de gestión y para retroalimentar la gestión adaptativa. La información que aporta, temporal y espacialmente explícita, es idónea para la elaboración de modelos que predigan los cambios inducidos al ecosistema por un determinado agente de cambio o una práctica de manejo determinada (CLARK y otros, 2001).

El SSA (Figura 3) no sólo está orientado hacia la «validación» y «documentación» de los cambios ocurridos, sino también a la identificación y corrección de problemas actuales. Por este motivo, junto a los módulos y productos de visualización que informan sobre el funcionamiento del ecosis-

Tipo de análisis	Niveles de estudio*	Preguntas de gestión
Estimación de valores medios de los atributos funcionales	Nacional Red Ecosistemas	¿Cómo varían en el espacio los principales descriptores del funcionamiento de los ecosistemas en España? ¿Cuáles son las condiciones de referencia de los parques/ecosistemas?
Estimación de las tendencias de los atributos funcionales y su nivel de significación	Nacional Red Ecosistemas	¿Cómo están cambiando los ecosistemas españoles? ¿Existe alguna tendencia de cambio direccional en los parques/ecosistemas? ¿Qué parques están cambiando más?
Estimación de las anomalías temporales y eventos extremos	Red Ecosistemas	¿Cómo se ha comportado el parque/ecosistema en el último período analizado (quincena, mes, estación, año) con respecto a la serie histórica? ¿Cómo se viene comportando el parque/ecosistema en el año en curso con respecto al mismo período en años anteriores?
Estimación de las anomalías espaciales	Ecosistemas	¿Qué áreas/localidades por las que se distribuye un ecosistema muestran un comportamiento anómalo o extremo?

Tabla 2. Tipos de análisis y preguntas de gestión que subyacen al desarrollo del sistema operativo de seguimiento y alerta. Los niveles de estudio se refieren a la escala espacial a la que corresponde el producto de visualización (mapas, gráficos) que se elabora en cada caso. Puesto que los análisis se realizan a partir del procesamiento de todas las escenas MODIS que cubren el territorio español, el detalle referido a un parque o un ecosistema resultará del cruce de la información espectral obtenido con las coberturas digitales que se requieran en cada caso.

Table 2. The analysis and management questions that underpin the monitoring and warning system. Study levels are related to the spatial scale at which corresponds the visualization product (maps, graphics) produced in each case. Since the analysis is carried out based on the processing of all MODIS scenes covering the Spanish territory, the details referring to a specific park or an ecosystem will result from intersection between the spectral information obtained and the digital coverage required in each case.

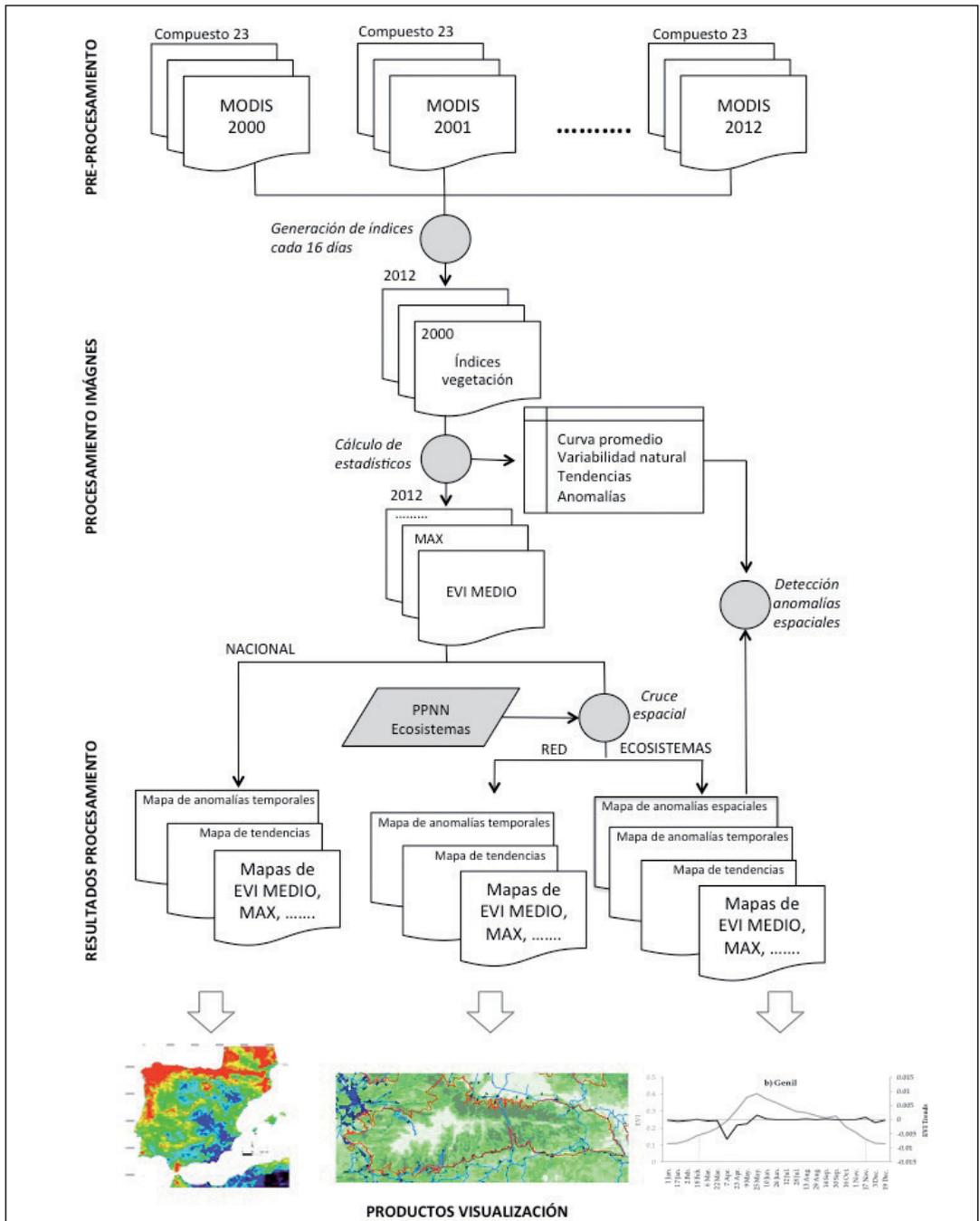


Figura 3. Arquitectura del sistema de seguimiento y alerta (SSA) propuesto para el seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas de la Red de Parques Nacionales de España.

Figure 3. Architecture of the monitoring and warning system proposed for monitoring the ecosystem functioning of the Spanish National Parks Network.

tema bajo una perspectiva histórica, se ha previsto que proporcione alertas sobre potenciales riesgos en los ecosistemas. Esto se hace a través de productos de visualización que informan sobre cambios repentinos en el funcionamiento de los ecosistemas (e.g., efectos de la sequía, efectos del pastoreo, cambios en la disponibilidad de agua, afecciones por plagas, etc.), agrupados en dos componentes: 1) detección de anomalías (saltos) y tendencias en el funcionamiento ecosistémico (¿dónde se producen? ¿cuándo se producen?) y 2) evaluación de la relevancia de la alerta. Éste último componente evalúa tres aspectos, la fortaleza, desviación y duración de la alerta. De esta forma se identifica qué tan diferentes son los nuevos valores del indicador de aquellos esperados en función del comportamiento histórico, si la alerta es simplemente un evento temprano o tardío, y el tiempo durante el que ésta se manifiesta.

Se han previsto tres niveles de desarrollo para el sistema: 1) *nivel nacional*, que brinda la posibilidad de obtener información para todo el territorio nacional, la obtención de este tipo de información resulta básica, ya que el procesamiento de las imágenes se hace para el conjunto de las escenas que cubren todo el territorio nacional, y su uso permite usar los espacios protegidos como áreas de referencia en las que los cambios de uso están minimizados, frente a las que evaluar los impactos del cambio global; 2) *nivel de Red*, que aportará información relativa al conjunto de la red de parques nacionales, informando sobre ellos de un manera global, sin detallar en las tipologías de ecosistemas y permitiendo establecer comparaciones entre parques; y 3) *nivel ecosistema*, que proporcionará información para evaluar el estado y dinámica de los ecosistemas de cada parque. La información relativa a parques y ecosistemas procederá de la extracción de los píxeles correspondientes del mosaico nacional mediante SIG.

Descubrir, integrar y analizar cantidades masivas de datos de distinta procedencia representa actualmente un tema central del análisis medioambiental y de los programas de seguimiento (MICHENER y otros, 2012). La importancia de este postulado es tal, que se considera que este

tipo de análisis representa el cuarto paradigma científico, tras el empírico (e.g., descripción de fenómenos naturales), el teórico (e.g., modelización y generalización) y el computacional (e.g., simulación), (HEY y otros, 2009) y ha sido ya aplicado por plataformas como LTER, DataONE o el Open Geospatial Consortium (OGC). Ante tal desafío el SSA ha sido concebido como una herramienta ecoinformática que pueda crecer y mejorar en respuesta a las necesidades de gestión, a los avances científicos y a la disponibilidad de nuevas tecnologías (MICHENER y otros, 2012). Para alcanzar este objetivo (i.e. ciencia abierta a la sociedad global y diseño de herramientas vivas) se ha considerado el uso de software libre y de código abierto, y la provisión de datos abiertos, aunque con diferentes niveles de permiso.

El SSA incluye ocho módulos que pueden ser integrados y automatizados a través del flujo de trabajo kepler (<http://kepler-project.org/>), un sistema también de código abierto, cuya versión actual permite automatizar el procesamiento de las imágenes y representar y operar con tipos de datos heterogéneos e invocar a servicios web. De esta forma se evitará el nivel de encriptamiento que suelen representar algunas fases del tratamiento de los datos, y se proporcionará un mecanismo para evaluar de una manera repetible los datos depositados en un repositorio, aunque estos tengan distintas procedencias y se produzcan en una enorme cantidad. Esta capacidad de «reproducibilidad» de todo el proceso proporciona enormes beneficios en áreas donde la investigación se aplica a temas de importancia social (BOWERS y otros, 2006), ya que es fundamental para dar respuesta a problemas administrativos, dar respaldo a las decisiones de gestión, y para la incorporación de la ciencia a la gestión.

RESULTADOS

Funcionamiento de referencia de la Red de Parques Nacionales

Los estudios que realizamos a partir de imágenes del sensor AVHRR nos permitieron establecer la dinámica estacional del verdor de la vegetación,

un subrogado de la intercepción de la radiación por parte de la vegetación, en la Red de Parques Nacionales de la Península Ibérica. Dicha dinámica responde a dos patrones principales de acuerdo con las regiones biogeográficas en las que se encuentran los parques: la eurosiberiana y la mediterránea. Aunque algunos parques de ambas regiones biogeográficas llegan a alcanzar valores similares en la intercepción de la radiación, las condiciones climáticas regionales determinan fuertes variaciones estacionales entre dichas regiones. A pesar de ello, no hemos encontrado un comportamiento interno homogéneo en los parques, y en algunos casos como Sierra Nevada, Doñana, Ordesa, Aigüestortes y Picos de Europa llegan a presentar una gran variabilidad tanto en los niveles de intercepción de la radiación, como en su estacionalidad (Figura 4).

En los parques eurosiberianos, la estación de crecimiento se centra en el comienzo del verano. En estos parques, el verdor de la vegetación se ve limitado por la temperatura durante el invierno, mientras que la disponibilidad de agua y el calor durante el verano, permiten que este parámetro sea relativamente alto en el contexto ibérico (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2006). Sin embargo, después de un máximo de intercepción de la radiación en junio y julio, ésta se reduce en agosto debido a limitaciones de agua y las elevadas temperaturas de final del verano, mostrando una baja variabilidad en cuanto a la intercepción de la radiación durante esta estación. Aunque el clima de verano en este ámbito biogeográfico es especialmente constante (RODÓ y otros, 2001), la dureza y variabilidad de las condiciones climáticas a lo largo del año, tiene un gran efecto sobre la variabilidad interanual del verdor de la vegetación en estos parques. Dada la relación entre el NDVI y la temperatura, consideramos que la alta variabilidad interanual del NDVI durante los meses de marzo y abril puede ser un buen indicador para los programas de vigilancia de Aigüestortes y Ordesa, ya que se ha comprobado que la variabilidad interanual de las temperaturas en estos meses afecta al patrón de la línea del árbol en el Pirineo Central (CAMARERO y GUTIÉRREZ, 2004).

Los parques mediterráneos se caracterizan por su baja estacionalidad y moderados valores del NDVI durante todo el año, sobre todo en Cabañeros y Monfragüe, parques en los que predominan los bosques de hoja perenne. El período de crecimiento en estos parques se inicia a finales de otoño, en correspondencia con un fenómeno que es llamado localmente "otoñada". Aunque este patrón otoñal es típico de las montañas mediterráneas de la península Ibérica (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2006), en Sierra Nevada, el parque que representa a la alta montaña mediterránea, el frío invernal sólo permite que el máximo de la radiación interceptada se produzca en primavera (especialmente en las partes más altas).

Debido a que el clima mediterráneo es muy impredecible, todos los parques de esta región muestran una mayor variación interanual en fenología y estacionalidad que los de la región eurosiberiana. Destaca en este sentido especialmente Doñana, que muestra la mayor variabilidad en cualquiera de los descriptores del funcionamiento analizados (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009b), lo que puede ser explicado por sus características ambientales. Este parque presenta una gran heterogeneidad de ecosistemas, incluyendo marismas, matorrales y bosques de pinos, y además, se ve afectado por una gran variabilidad interanual en las precipitaciones, y en la disponibilidad de agua que se ve afectada por los usos antrópicos que se desarrollan en su área de influencia (cultivos e inundaciones controladas, FERNÁNDEZ-DELGADO, 2006).

En relación a los controles ambientales del funcionamiento ecosistémico, hemos encontrado una relación positiva entre el NDVI-I (un subrogado de la productividad primaria) y la precipitación y temperatura anual (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008b), aunque el porcentaje de la varianza observada en el verdor de la vegetación explicada por estos dos factores fue bajo. Esta relación, no obstante, revela la restricción que la disponibilidad de agua impone a la productividad, que aunque es mucho más crítica para los parques de la Región mediterránea también afecta a los eurosiberianos. Por otro lado, la relación positiva del NDVI-I con la temperatura muestra como las

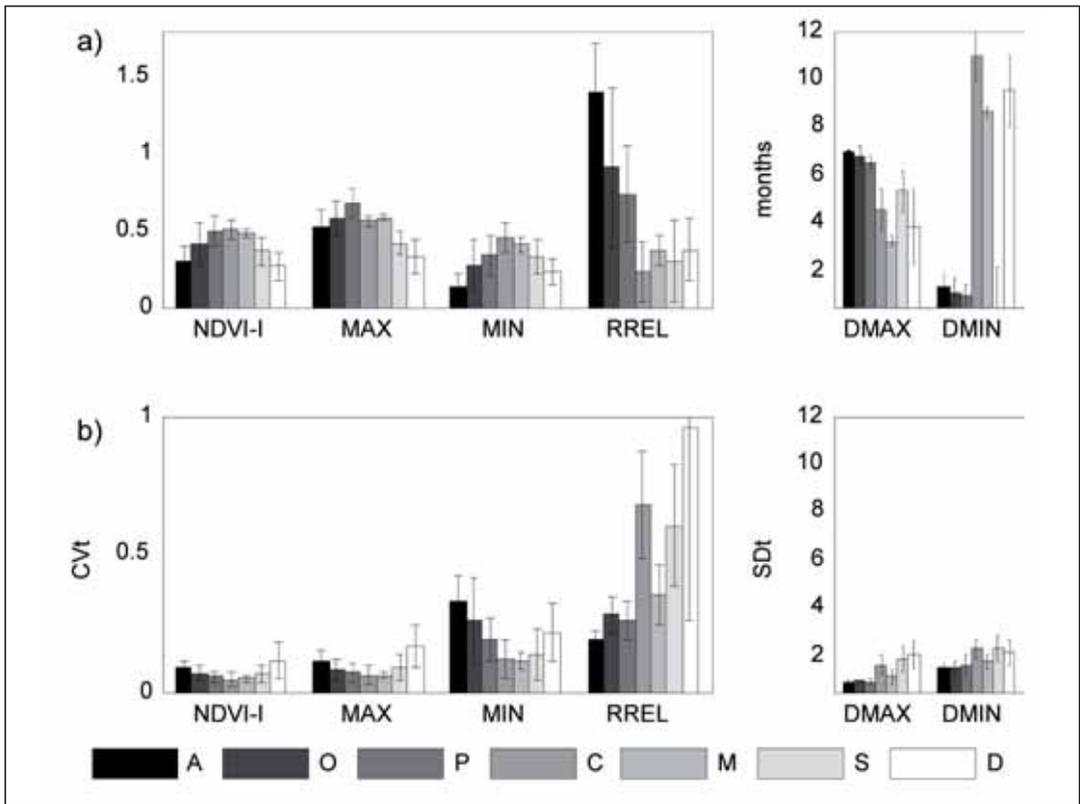


Figura 4. Caracterización de las condiciones de referencia del funcionamiento de los ecosistemas de los parques nacionales españoles a partir de seis descriptores derivados de la dinámica estacional del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) para el periodo 1982-2006 (tomado de ALCARAZ-SEGURA et al., 2009). a) Valores medios para cada atributo en cada parque. b) Variabilidad interanual de los seis descriptores funcionales para cada Parque calculada como el coeficiente de variación interanual (CVt) para NDVI-I (media anual de NDVI), RREL (rango relativo anual de NDVI), MAX y MIN (máximo y mínimo anual de NDVI), y como el desvío estándar interanual (SDt) para DMAX y DMIN (días del máximo y mínimo de NDVI respectivamente). Parques Nacionales: A: Aigüestortes i E. S. Maurici; O: Ordesa y Monte Perdido; P: Picos de Europa; C: Cabañeros; M: Monfragüe; S: Sierra Nevada; D: Doñana. Las barras de error indican el desvío estándar espacial. Tomado de ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009b. Reproducido con permiso de SpringerLink.

Figure 4. Ecosystem functioning baseline conditions of the Spanish National Parks based on six descriptors resulting from the seasonal dynamics of Normalized Difference of Vegetation Index (NDVI) for the period 1982-2006 (from ALCARAZ-SEGURA et al., 2009). a) Mean values for each functional descriptor in each park. b) Interannual variability of the six descriptors for each Park estimated as the coefficient of variation (CVt) for NDVI-I (NDVI annual mean), RREL (NDVI annual relative range), MAX and MIN (NDVI annual maximum and minimum), and as annual standard deviation (SDt) for DMAX and DMIN (days with the maximum and minimum NDVI value, respectively). National Parks: A: Aigüestortes i E. S. Maurici; O: Ordesa y Monte Perdido; P: Picos de Europa; C: Cabañeros; M: Monfragüe; S: Sierra Nevada; D: Doñana. The error bars show the spatial standard deviation. From ALCARAZ-SEGURA y col. 2009b. With permission from SpringerLink.

bajas temperaturas limitan el crecimiento de la vegetación, lo que resulta particularmente importante en las altas montañas mediterráneas y en la región eurosiberiana. La precipitación y la temperatura determinan también la estacionalidad de la intercepción de la radiación, que es más

baja en las regiones cálidas y tiende a aumentar en los parques eurosiberianos a medida que aumenta su variabilidad estacional en la lluvia.

El clima no es, sin embargo, el único control ambiental de la productividad y estacionalidad de

los ecosistemas (CABELLO y otros, 2012a). La heterogeneidad en los tipos de vegetación que albergan los parques, representa una fuente de variabilidad inter- e intra-anual del NDVI mayor aún que la precipitación y temperatura (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008b). De manera genérica, la presencia de bosques mixtos y de hoja plana tiende a aumentar significativamente la media anual de NDVI (NDVI-I), mientras que los cultivos marginales y la vegetación dispersa la disminuye. En el caso de los parques eurosiberianos, este valor aumenta a medida que lo hace la presencia de bosques de hoja caduca, desde Aigüestortes donde predominan los bosques de *Abies* y *Pinus sylvestris*, hasta Ordesa con bosques de coníferas junto a bosques mixtos y de hoja caduca, y finalmente, Picos de Europa, donde los bosques de haya ocupan una gran superficie (*Fagus sylvatica*). En los parques mediterráneos, la productividad aumenta a medida que son más abundantes los bosques esclerófilos (i.e. *Quercus rotundifolia* y *Q. suber*).

En relación con la estacionalidad, ésta es significativamente mayor en los píxeles dominados por bosques alpinos, brezales y, sobre todo, la vegetación dispersa de alta montaña. Este atributo funcional es significativamente menor en las áreas en las que predominan los matorrales esclerófilos de hoja perenne y los bosques mediterráneos de coníferas. Estas diferencias en los valores de productividad y estacionalidad, ponen de manifiesto la importancia que los cambios en la cobertura vegetal tienen sobre el funcionamiento de los ecosistemas, y por tanto, que éstos atributos pueden ayudar a monitorear los efectos de los cambios de uso del suelo y los procesos de sucesión.

Tendencias y efectos recientes del cambio global y del manejo sobre el funcionamiento ecosistémico a escala de red

Casi todos los parques han cambiado significativamente en los últimos 25 años en relación a la productividad anual de sus ecosistemas, la estacionalidad y la fenología (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008b) (Figura 5). Sin embargo, algunos

parques concentran más cambios que otros y el grado que estos cambios han adquirido varió en función de las condiciones ambientales, la gestión y la historia de conservación de los diferentes parques. Como patrón general (Figura 6), observamos un aumento en los valores anuales de la media de NDVI (i.e. aumento en la productividad anual) y en los valores mínimos de ésta variable (MIN), y un descenso en sus valores máximos y en el contraste entre las estaciones de crecimiento y no crecimiento (i.e. estacionalidad). Además hemos observado un adelanto de los momentos de máximo y mínimo NDVI, lo que indica importantes cambios en la fenología de los ecosistemas. Las tendencias observadas, difieren no obstante, tanto en signo como en magnitud entre los parques de una misma región biogeográfica. Así, parques muy próximos y similares en tipos de vegetación mostraron diferentes tendencias, como hemos podido observar en el caso de Aigüestortes y Monfragüe de la región euro-siberiana, y de Monfragüe y Cabañeros de la región mediterránea.

En los parques eurosiberianos, el aumento generalizado de las temperaturas parece haber ocasionado un incremento de la actividad vegetal en primavera al comienzo de la estación de crecimiento relacionado con un adelantamiento de la misma (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008a). Esto puede resultar en un mayor consumo de agua en primavera y, por tanto, un aumento del estrés hídrico durante el verano, provocando un descenso en la interceptación máxima de radiación de final del verano, justo en mitad de la estación de crecimiento. Por el contrario, en los parques mediterráneos, el aumento de las temperaturas ha favorecido un mayor incremento de la actividad vegetal durante el período frío de otoño-invierno, pero también una aceleración de la senescencia tras el máximo de interceptación de radiación de primavera, probablemente también asociado a un aumento del estrés hídrico, lo que ha provocado un adelantamiento de la fecha del mínimo NDVI (ALCARAZ-SEGURA y otros 2008a).

En relación con los controles ambientales de las tendencias del NDVI, sólo la altitud mostró una

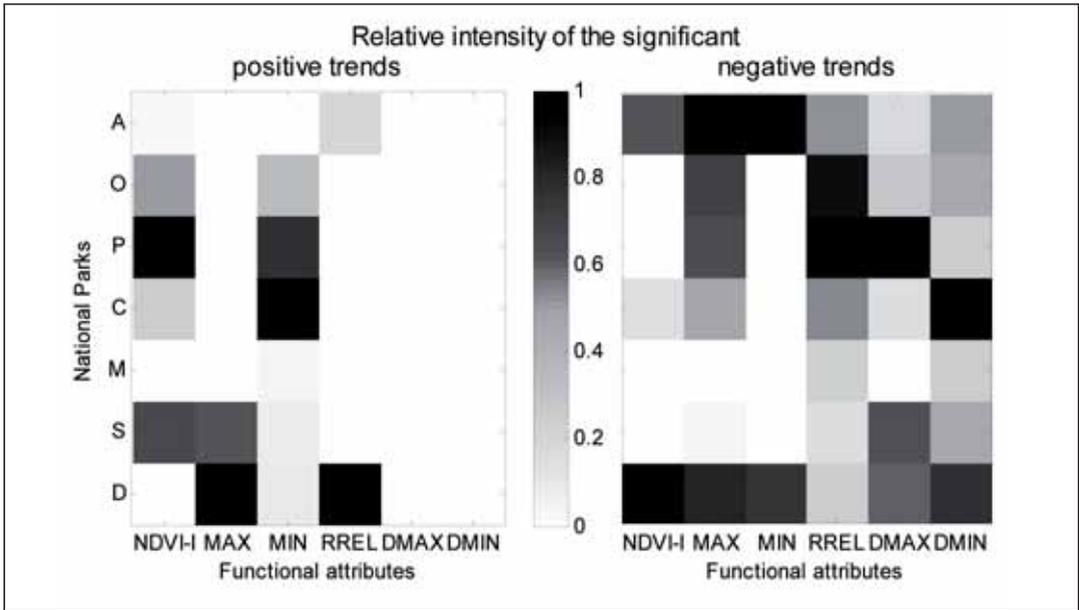


Figura 5. Comparación entre parques nacionales (eje Y) de las tendencias significativas mostradas por los descriptores funcionales de la curva anual de NDVI (eje X) entre 1982 y 2006, usando el test de tendencias de Mann-Kendall y la base de datos GIMMS. Para facilitar la comparación de las pendientes de los diferentes descriptores, se calculó la intensidad relativa de dichas tendencias multiplicando el porcentaje de píxeles con tendencias significativas por el valor de su pendiente y, normalizando después estos productos entre 0 y 1 (dividiendo cada producto por el valor del producto máximo para ese atributo). NDVI-I: media anual de NDVI, RREL: rango relativo anual de NDVI, MAX y MIN: máximo y mínimo anual de NDVI, y DMAX y DMIN: días del máximo y mínimo de NDVI respectivamente. Parques Nacionales: A: Aigüestortes i E. S. Maurici; O: Ordesa y Monte Perdido; P: Picos de Europa; C: Cabañeros; M: Monfragüe; S: Sierra Nevada; D: Doñana. Tomado de ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009b. Reproducido con permiso de SpringerLink.

Figure 5. Comparison between national parks (Y axis) for the significant trends of functional descriptors of NDVI annual curve (X axis) found between 1982 and 2006, using the Mann-Kendall trend test and GIMMS database. To facilitate the comparison between various attributes slopes, was calculated the relative trends intensity, first multiplying the percentage of pixels with significant trends for its slope value and then normalizing these products between 0 and 1 (for each attribute, each product was divided by the maximum output value for that attribute). NDVI-I: NDVI annual average; RREL: NDVI annual relative range; MAX and MIN: NDVI annual maximum and minimum; DMAX and DMIN: days with the maximum and minimum NDVI value, respectively. National Parks: A: Aigüestortes i E. S. Maurici; O: Ordesa y Monte Perdido; P: Picos de Europa; C: Cabañeros; M: Monfragüe; S: Sierra Nevada; D: Doñana. From Alcaraz-Segura y col. 2009b. With permission from SpringerLink.

relación ligeramente positiva con éstas. Aunque este factor solo explica un porcentaje muy pequeño (5%) de la variabilidad observada en las tendencias ($n = 117$, $\beta = 0,23$, $r^2 = 0,05$, $p = 0,01$; valor de $p < 0,05$), los parques que incluyen alta montaña, como Sierra Nevada, Picos de Europa y Ordesa, mostraron las mayores áreas (número de píxeles) con tendencias positivas (del 30% al 55% de los píxeles; Fig. 4). Aunque de naturaleza completamente opuesta, Doñana también mostró una gran superficie con tendencias positivas. Ninguna de las variables climáticas analizadas (precipitación y temperatura media anual) ni el

año en el que se establecieron los parques mostraron asociación significativa con las tendencias del NDVI, una relación que si fue observada para algunos tipos de vegetación. En general, las tendencias positivas del NDVI se produjeron en píxeles, con un porcentaje elevado de superficie ocupada por bosques mediterráneos de coníferas, brezales, maquis, garrigas, y herbazales oro-mediterráneos y matorrales y bosques mixtos y bajo porcentaje de vegetación dispersa y dehesas. Los píxeles con tendencias negativas considerables correspondieron a marismas y saladares, y a bosques de coníferas alpinas.

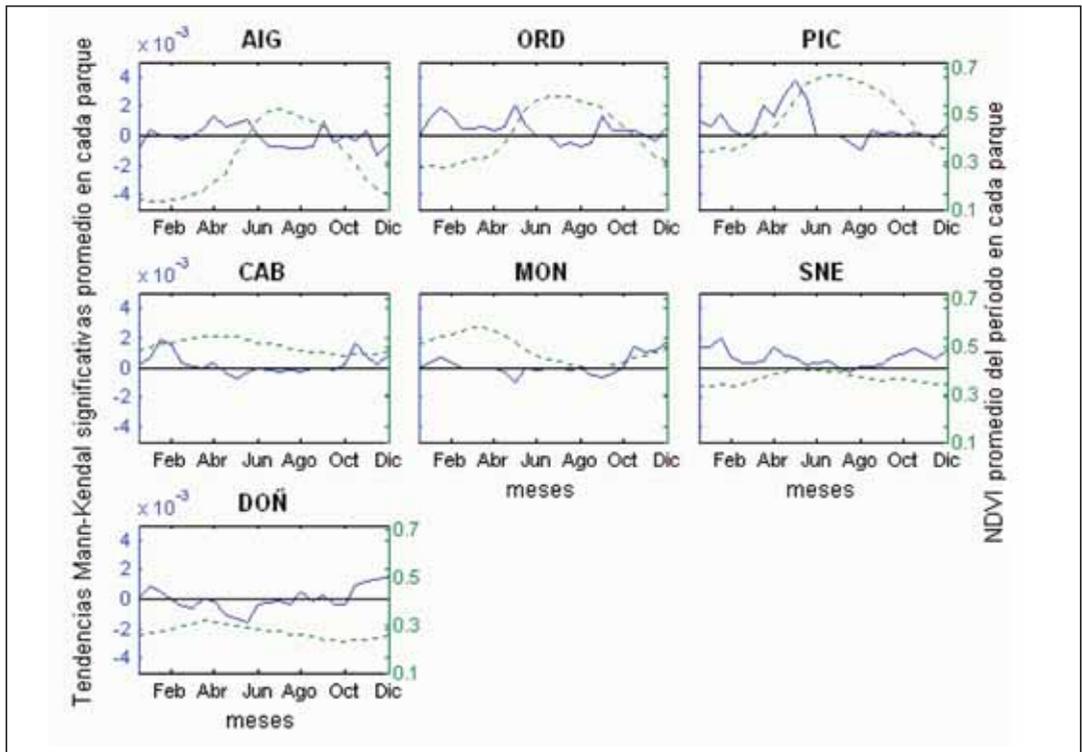


Figura 6. Comparación entre siete parques nacionales españoles de las tendencias de la dinámica estacional del NDVI en el período 1982-2006. En el eje de la izquierda (azul continuo) se representa el promedio del parque para las pendientes significativas obtenidas con el test de tendencias de Mann-Kendall (valor $P < 0.05$). En el eje de la derecha (verde discontinuo) se representa la dinámica estacional promedio del NDVI en el mismo periodo. En el eje X, los 12 meses del año. Parques Nacionales: AIG: Aigüestortes i E. S. Maurici; ORD: Ordesa y Monte Perdido; PIC: Picos de Europa. Parques Mediterráneos: CAB: Cabañeros; MON: Monfragüe; SNE: Sierra Nevada; DOÑ: Doñana. Tomado de ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008a. Reproducido con permiso de Ecosistemas (Asociación Española de Ecología Terrestre).

Figure 6. Comparison between seven Spanish National Parks of the NDVI seasonal dynamics trends in 1982-2006. The left axis (steady blue) shows the park average for the significant slopes obtained with the Mann-Kendall trend test (P -value < 0.05). The right axis (dashed green) shows the NDVI average seasonal dynamics for the same period. The X axis shows the 12 months of the year. National Parks: AIG: Aigüestortes i E. S. Maurici; ORD: Ordesa y Monte Perdido; PIC: Picos de Europa. Parques Mediterráneos: CAB: Cabañeros; MON: Monfragüe; SNE: Sierra Nevada; DOÑ: Doñana. From ALCARAZ-SEGURA et al. 2008. Reprinted with permission from Ecosistemas (Spanish Society for the Terrestrial Ecology).

Un ejemplo de aplicación del sistema operativo de seguimiento y alerta a escala de ecosistema: los robledales del PN de Sierra Nevada

Un ejemplo de la aplicabilidad del SSA a escala del ecosistema es el realizado para los robledales de *Quercus pyrenaica* del Parque Nacional de Sierra Nevada (DIONISIO y otros, 2012). Este estudio proporcionó información de interés para el establecimiento de prioridades y orientación de

las acciones de gestión para estos bosques, ya que la aplicación del SSA nos permitió establecer una caracterización de referencia funcional de todos los parches de robledal del Parque para el período 2001-2009.

De acuerdo con esta caracterización, éstos bosques muestran una dinámica estacional del EVI unimodal con una estación de crecimiento única y bien definida centrada en el verano, lo que representa una singularidad en los ambientes me-

diterráneos (COSTA y otros, 2005). A pesar de esta dinámica general, la caracterización funcional de los robledales y la evaluación de los cambios que están sufriendo, ponen de manifiesto una gran heterogeneidad en su funcionamiento. El mayor verdor anual (media de EVI) de los bosques de la vertiente sur se debe probablemente a la mayor incidencia de radiación solar que favorece estaciones de crecimiento más largas, temperaturas más templadas durante el invierno y un suministro de agua adicional de masas de aire húmedo procedente del mar Mediterráneo, en comparación a los lugares más fríos y más continental de la vertiente norte.

En relación con las tendencias que muestran éstos bosques (Figura 7), se encontraron cambios funcionales importantes en el período de estudio (2001-2009), que afectan principalmente al inicio de la estación de crecimiento, momento en el que se observan fuertes descensos del EVI (marzo-abril), sobre todo en la vertiente noroeste, aunque dichos cambios no implicaron tendencias significativas en los promedios anuales. Los descriptores empleados nos permitieron detectar anomalías temporales y espaciales, una información esencial para orientar acciones de gestión específicas en áreas particulares. Además, las desviaciones espaciales y temporales de las condiciones de referencia detectadas pueden servir de alerta de cambios discretos «dentro del estado» de los bosques como resultado de los impactos acumulativos (VOGELMANN y otros, 2009).

DISCUSIÓN

El papel de los parques nacionales como sistemas de referencia frente a los efectos del cambio global

La necesidad de contar con situaciones de referencia para evaluar el impacto de las actividades humanas y los cambios climáticos y biogeoquímicos sobre distintos procesos ecosistémicos le asigna particular importancia a la descripción del funcionamiento de los ecosistemas en los parques nacionales. Estas condiciones de referencia

reclamadas por ejemplo en la implementación de la Directiva Hábitat, pueden constituir la base para la evaluación del estado de conservación de los ecosistemas de los parques. Por otro lado, si bien los ecosistemas de los parques no representan necesariamente la vegetación potencial de una región biogeográfica, su estudio resulta la mejor aproximación al funcionamiento potencial en muchos ecosistemas (controlado fundamentalmente por factores como el clima o el tipo de suelo). Incluso, a través de su relación con otras variables ambientales, esta aproximación puede constituir un modo de generar mapas de referencia a escala regional que permitan evaluar el impacto del uso de la tierra sobre distintos procesos ecosistémicos (STOMS y HARGROVE, 2000; GARBULSKY y PARUELO, 2004). Por otro lado, la exhaustiva información (historia de usos del suelo, descripciones estructurales de la vegetación, distribución de especies, estaciones experimentales y de muestreo, etc.) con que se cuenta en la actualidad sobre las áreas protegidas españolas, más aun en los parques nacionales, las convierte en lugares ideales para los propósitos mencionados. El funcionamiento de los ecosistemas conservados, su dinámica estacional y su variabilidad interanual son en muchos casos poco conocidos. Sin embargo, el estudio de la variabilidad de los cambios, su tasa, magnitud y dirección, resulta esencial para la planificación de la conservación (HALPIN, 1997). La falta de este tipo de conocimientos ecológicos básicos y de las influencias del cambio global dificulta la evaluación de la conservación y el manejo de los recursos.

La comparación de las áreas protegidas con las áreas circundantes no conservadas brinda evidencias acerca de los efectos de la agricultura, la ganadería y la silvicultura sobre el funcionamiento de los ecosistemas (GARBULSKY y PARUELO, 2004; PARUELO y otros, 2005). De hecho, los parques nacionales constituyen ejemplos representativos de los grandes ecosistemas de un país, y la diversidad de situaciones ecológicas que ello genera junto con los diferentes grados de alteración antropogénica a los que tanto ellos mismos como sus entornos han estado sometidos, genera un sistema experimental muy

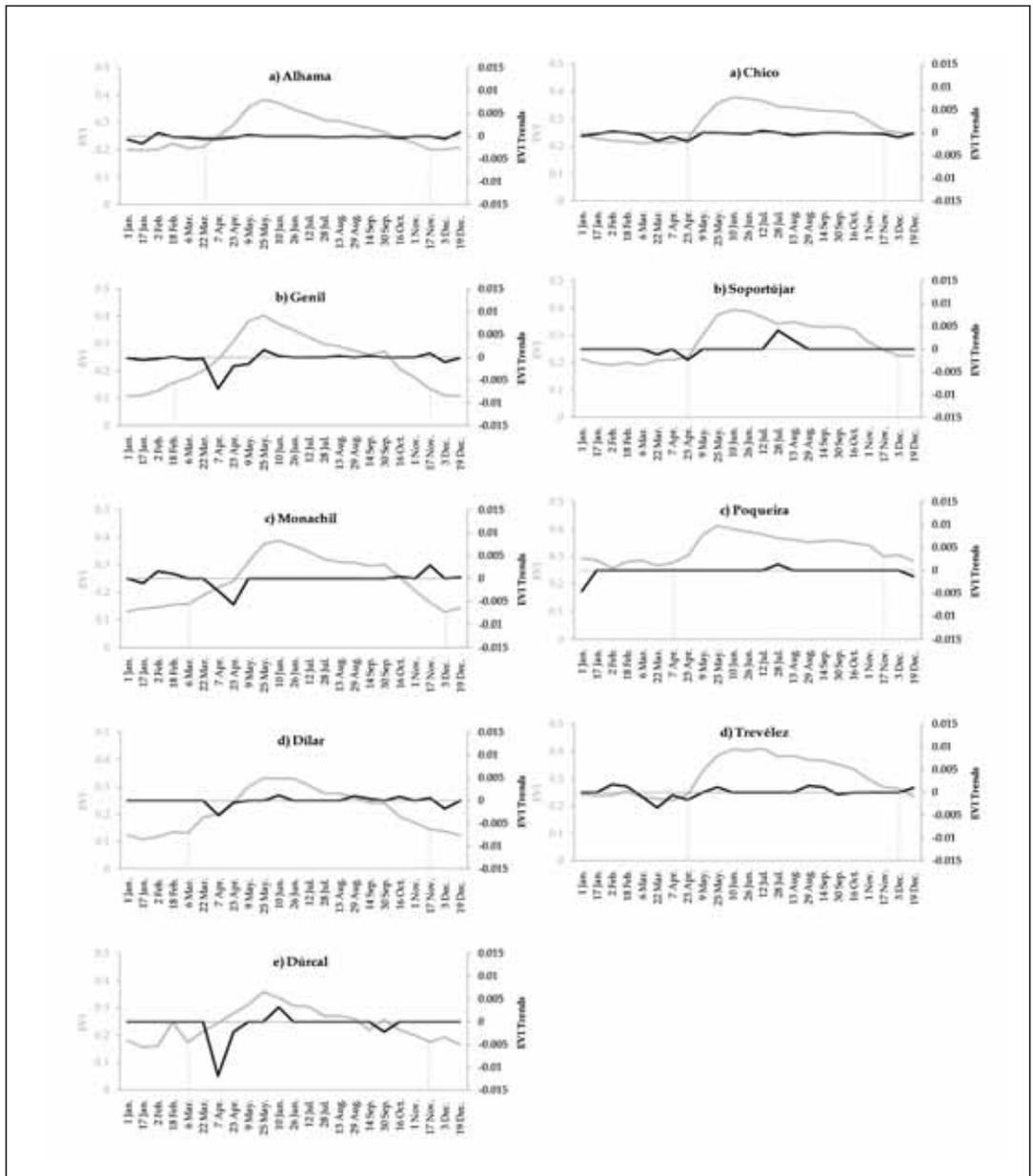


Figura 7. Dinámica estacional del índice de vegetación mejorado (EVI) (en gris sobre el eje Y izquierdo) y tendencias (EVI Trends) del mismo entre 2001 y 2009 (en negro sobre el eje Y derecho) observadas en la cara norte (columna izquierda) y en la cara sur (columna derecha) de Sierra Nevada. La línea horizontal de «tendencia cero» muestra la ausencia de tendencias significativas en ese momento del año. Las dos líneas grises verticales punteadas marcan el principio y el final de la estación de crecimiento. Tomado de Dionisio y otros, 2012.

Figure 7. Seasonal dynamics of Enhanced Vegetation Index (EVI) (in gray on the left axis) and trends (EVI trends) of the same between 2001 and 2009 (in black on the right y-axis) observed on the north side (left column) and on the south side (right column) of Sierra Nevada. The horizontal line of «zero trend» shows the absence of significant trends at that time of the year. The two dotted vertical gray lines signal the beginning and end of the growing season. From Dionisio et al. 2012.

adecuado en el que estudiar las variaciones a lo largo de gradientes ambientales y los efectos del cambio de usos del suelo, climáticos o biogeográficos.

Las tendencias observadas en los atributos ecosistémicos de áreas protegidas muestran claramente que, en un contexto de cambio global, la conservación debe ser adaptativa. La gestión de las áreas protegidas debe incorporar los cambios observados en el funcionamiento ecosistémico para anticiparse a las consecuencias y para dirigir las transiciones inevitables entre estados alternativos. A su vez, los resultados que se derivan de este trabajo enfatizan la necesidad de tener en cuenta múltiples dimensiones del funcionamiento ecosistémico de cara al seguimiento de las redes de áreas protegidas.

Los análisis realizados mostraron tendencias significativas no sólo en el valor del NDVI global (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008b), sino también en diferentes indicadores funcionales de la productividad, estacionalidad y fenología (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009b), y en la forma de la curva anual de NDVI (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2008a). Estos resultados sugieren que también la estacionalidad y fenología del verdor de la vegetación han experimentado cambios importantes (e.g. entre 1982 y 2006). Como patrón general, en todos los parques la intercepción de radiación (productividad) tendió a aumentar, el contraste entre la estación de crecimiento y de reposo (estacionalidad) tendió a disminuir, y las fechas de máxima y mínima intercepción (fenología) tendieron a adelantarse en el año (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009b). Por otro lado, las tendencias negativas tendieron a ocurrir en la época del año con alto NDVI, mientras que las tendencias positivas acontecieron en los periodos del año con valores de NDVI entre moderados y bajos.

Un análisis individual para cada parque

En Picos de Europa y Ordesa, el aumento importante del verdor de la vegetación, consistente con los patrones regionales descritos para el

norte de la península Ibérica (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2010), y el descenso en la estacionalidad pueden ser indicadores tempranos de procesos de sustitución en los biomas de dichos parques. Mientras los bosques caducifolios de estos parques son muy estacionales, y su crecimiento está limitado por los mínimos de invierno, los bosques esclerófilos que albergan, presentan baja estacionalidad y valores moderados de NDVI durante el invierno (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009a). De hecho, la sustitución de vegetación subalpina y bosques caducifolios eurosiberianos por el ascenso de la vegetación mediterránea perennifolia es un proceso que ha sido documentado en una transición biogeográfica similar en el NE de España (PEÑUELAS y BOADA, 2003). La intensificación de la regeneración del bosque subalpino en los Pirineos Centrales (CAMARERO y GUTIÉRREZ, 1999) (en Ordesa) y los aumentos regionales observados en la temperatura (BRUNET y otros, 2001; SERRA y otros, 2001) y en la precipitación (DE CASTRO y otros, 2005) (en Picos de Europa y Ordesa) pueden haber contribuido a los cambios observados en la media y mínimo anual de NDVI y la reducción en la estacionalidad (RREL).

En Sierra Nevada, Cabañeros, y Monfragüe, también observamos tendencias positivas en la media y mínimo anual de NDVI y negativas en el RREL. En Sierra Nevada, donde el calentamiento está causando un ascenso altitudinal de las especies (HÓDAR y ZAMORA, 2004), observamos aumentos significativos en la intercepción de radiación pese a la ausencia de tendencias significativas en la precipitación (GALÁN y otros, 1999). En Monfragüe y, especialmente, en Cabañeros, el gran aumento en las temperaturas de invierno (BRUNET y otros, 2001; CAÑADA y otros, 2001; GALÁN y otros, 2001) ha favorecido el gran aumento de los valores mínimos de NDVI de invierno. Por el contrario, los suaves incrementos de las temperaturas máximas en primavera y verano (STAUDT, 2004) parecen haber originado tanto suaves aumentos (Sierra Nevada) como disminuciones (Cabañeros, Monfragüe y Doñana) del NDVI en función del parque (ALCARAZ-SE-

GURA y otros, 2008a). A parte de los cambios en el clima, la protección en estos parques parece haber traído consigo la eliminación de las formas de uso del suelo agresivas, lo que podría haber favorecido el proceso de matorralización (VALLADARES y otros, 2004). Este hecho también podría explicar la disminución observada en la estacionalidad y el aumento en los valores mínimos y medios del NDVI.

Los parques de Doñana y Aigüestortes mostraron tendencias ligeramente distintas al del resto de los parques de su región biogeográfica; son los únicos con áreas que muestran tendencias positivas en la estacionalidad y negativas en los valores medios, máximos y mínimos de NDVI. A pesar de la alta variabilidad interanual observada en Doñana (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2009b), parte del parque mostró reducciones significativas en intercepción de radiación media, máxima y mínima. Esta reducción es consistente con las tendencias regionales del NDVI (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2010) asociadas a un descenso en las precipitaciones y un aumento en las temperaturas debido a la oscilación del Atlántico Norte (VICENTE-SERRANO y HEREDIA-LACLAUSTRA, 2004) y a una más temprana desecación del humedal en el verano y el aumento de la herbivoría desde los ochenta (FERNÁNDEZ-DELGADO, 2006). Sin embargo, otras partes de Doñana, dominadas por matorrales y bosques esclerófilos, mostraron tendencias positivas del NDVI y negativas de la estacionalidad de forma contraria al patrón regional de descenso del NDVI observado en el cuadrante SW ibérico (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2010), pero coincidentes con el resto de parques mediterráneos.

En el caso de Aigüestortes, parte del parque también mostró tendencias consistentes con el patrón regional hacia un aumento en la intercepción de radiación y menor estacionalidad (ALCARAZ-SEGURA y otros, 2010), lo que también es consistente con el resto de parques eurosiberianos. Sin embargo, otras partes de Aigüestortes mostraron tendencias negativas de la media y mínimo NDVI contrarias a los aumentos generalizados observados en los estu-

dios regionales. En estas áreas, los estudios preliminares han mostrado un declive en el éxito del establecimiento de plántulas de árboles en el límite del árbol (E. Gutiérrez, comunicación personal) probablemente asociado a un aumento en la variabilidad interanual de la temperatura (CAMARERO y GUTIÉRREZ, 2004). De hecho, en la caracterización de referencia, Aigüestortes mostró la mayor variabilidad interanual de la intercepción de radiación de todos los parques, particularmente para el mínimo de NDVI.

Aplicación del sistema de seguimiento y alerta a la conservación y gestión de la Red de Parques Nacionales

Una primera ventaja que se deriva del desarrollo de un SSA en la Red de Parques Nacionales como el que se propone, es su bajo coste y la capacidad de que dispone para proporcionar datos de forma sistemática y homogénea. La arquitectura del sistema y el tipo de datos con los que funciona permiten proporcionar información útil para la priorización de las acciones de gestión. De hecho, el sistema aporta información temporal y espacialmente explícita, que es idónea para la elaboración de modelos que predigan los cambios inducidos al ecosistema por un determinado manejo o agente de cambio ambiental, facilitando al gestor la toma de decisiones al anticipar el resultado de medidas adoptadas en el ámbito de la gestión del uso o conservación del ecosistema (CLARK y otros, 2001). Por otro lado, todas las estrategias y programas de seguimiento ambiental se basan sobre cuestiones diseñadas para evaluar el estado actual y los cambios que tienen en los ecosistemas. Sin embargo, éstas no suelen ser visiblemente expresadas lo que reduce la capacidad del sistema para guiar las acciones de gestión y la divulgación de los resultados de éstas. En realidad, los programas de seguimiento son de poco uso sin una clara definición de estas cuestiones y de los objetivos de seguimiento que se pretenden satisfacer, por lo que el SSA se ha planteado a partir de los productos de visualización que permiten ilustrar preguntas básicas

relacionadas con la gestión de los ecosistemas. Dichas cuestiones y productos de visualización deberán evolucionar a medida que se establezcan modelos conceptuales para definir a los ecosistemas, y en función de la experiencia de gestión e investigación que se vaya adquiriendo (LINDEMAYER y otros, 2011).

Los datos sobre los que se soporta el SSA se generan a partir del análisis de la serie temporal de índices de vegetación (NDVI y EVI) MODIS y de diferentes indicadores derivados de la dinámica temporal de los mismos relacionados con la productividad, estacionalidad y fenología. Éstos indicadores ofrecen, como ya se ha comentado, ventajas frente al uso tradicional de los atributos estructurales. Pero además, la disponibilidad de largas series temporales permite la caracterización de tres aspectos básicos para evaluar la integridad de los ecosistemas: 1) una descripción de referencia del funcionamiento ecosistémico; 2) la caracterización de la variabilidad estacional e interanual de los principales sistemas naturales de los parques nacionales desde el año 2000; 3) la estimación de tendencias de cambio direccionales. El establecimiento de estas condiciones de referencia de acuerdo con un «comportamiento medio» es lo que hace posible la identificación de anomalías espaciales y temporales. Por otro lado, como hemos visto, los resúmenes anuales no son suficientes como indicadores de seguimiento, ya que los cambios funcionales pueden ocurrir en las etapas clave estacionales sin afectar a las medidas anuales. Además, puesto que el sistema, y por tanto, la caracterización funcional de los ecosistemas se va enriqueciendo con cada nueva imagen que es incorporada cada 16 días, estas caracterizaciones no serán estáticas, cumpliendo con otro de los requisitos de las condiciones de referencia, como es el de ser expresadas mediante referencias dinámicas, es decir, de acuerdo con las trayectorias que se espera que sigan los ecosistemas.

La identificación de cambios direccionales en el tiempo o tendencias representa un aspecto clave en la evaluación de los efectos del cambio global, ya que dichas tendencias pueden estar en relación con perturbaciones visibles que induz-

can cambios de estado en los ecosistemas, pero también pueden alertar sobre inconspicuos cambios en el ecosistema solo perceptibles a lo largo de una serie temporal sin necesidad de que cambie su estado (VOGELMANN y otros, 2009). Este tipo de análisis que identifica patrones temporales en una secuencia de imágenes tiene la ventaja de detectar procesos más sutiles, frente a los análisis basados en la comparación entre clases en fechas determinadas (KENNEDY y otros, 2009), permitiendo la identificación temprana de procesos que afectan al funcionamiento del ecosistema. De esta forma el gestor puede anticipar su respuesta y adaptar sus estrategias de manejo cuando aún los cambios no sean irreversibles.

Otra de las ventajas del sistema de seguimiento es que podría incorporar varios objetivos de seguimiento a la vez. Los cambios en los atributos de EVI están directamente relacionados con los cambios en la cantidad, estacionalidad y fenología de las ganancias de carbono del ecosistema. Pero además, el seguimiento de un ecosistema particular puede ser la base para evaluar y monitorear el estado de conservación del hábitat de especies de interés para la conservación asociadas a dicho ecosistema. Este podría ser el caso del herrerillo (*Parus caeruleus*), cuyo éxito reproductivo está relacionado con el estado de los ecosistemas de bosques de *Quercus pyrenaica*, especialmente al comienzo del período reproductivo femenino (abril-mayo), que está asociado con el inicio de la estación de crecimiento (ARRIERO y otros, 2006). Esta asociación implica que los retrasos observados en el inicio de la estación de crecimiento de este tipo de bosques en Sierra Nevada, pueden estar afectando negativamente a su capacidad de reproducción. Por otra parte, la información derivada de este método de seguimiento podría ayudar a guiar la ordenación del territorio para evitar la sobreexplotación de éstos bosques, limitando por ejemplo, la presión del ganado en aquellas épocas del año que están experimentando fuertes tendencias negativas de EVI.

El Organismo Autónomo Parques Nacionales (OAPN) tiene la intención de adoptar y desa-

rollar el SSA propuesto para aplicarlo a la Red Española de Parques Nacionales (http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/organizacion/organismos-publicos/seg_teledeteccion_tcm7-171620.pdf). Este objetivo implica el desarrollo del SSA propuesto considerando los aspectos técnicos y ecológicos que han sido expuestos, de manera que sea operativo y extensible a todos los parques nacionales. Además podría operar a través de todas las escalas espaciales en las que se enmarcan los ecosistemas terrestres de España, desde el territorio nacional hasta cada uno de los parques que integran la red, y la información que genere podrá ser compatible con el resto de información SIG del OAPN, dentro del Plan de Seguimiento del Estado de los Sistemas Naturales de la Red de Parques Nacionales. Por otro lado, dada la generalización de los datos de satélite, y la facilidad y universalidad de generación de los indicadores funcionales que se propone, el sistema podrá ser extendido a otras áreas, enriqueciéndose de la experiencia en su uso en otros lugares y con otros equipos y participando, por tanto, de evaluaciones globales.

Un aspecto importante para mejorar la herramienta, sería que el programa de seguimiento fuera acompañado de la identificación de los procesos ecológicos claves que subyacen al mantenimiento de la integridad ecológica y a los cambios observados. Por ejemplo, las diferencias en la intensidad de las tendencias de EVI entre las diferentes parches de los bosques de roble parecen estar asociadas a dos modos de la variabilidad climática que afectan a Sierra Nevada (NAO y WeMO) (LIRAS, 2010). Si llega a conocerse esta relación en profundidad, los resultados obtenidos en las tendencias podrían utilizarse para priorizar acciones de gestión en relación a la adaptación al cambio climático en los sitios más amenazados. Sin embargo, esta debe ser sólo una de las hipótesis guía para la gestión adaptativa, ya que otros procesos tales como daños por insectos y la sucesión de los bosques también podría estar teniendo lugar en el parque (gestores del Parque Nacional de Sierra Nevada, comunicación personal).

CONCLUSIONES

Los trabajos realizados nos han permitido detectar que están ocurriendo cambios significativos en la práctica totalidad de la Red Española de Parques Nacionales: la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (un subrogado de la productividad primaria) está aumentando, la estacionalidad está disminuyendo, y la fenología del máximo y del mínimo de radiación interceptada se está adelantando en el año. Estos hallazgos proporcionan una nueva perspectiva para el desarrollo de programas de seguimiento en áreas protegidas, para los que recomendamos el uso de atributos funcionales derivados de imágenes de satélite, ya que éstos permiten evaluar fácilmente la respuesta de los ecosistemas frente a los cambios ambientales. El sistema de seguimiento y alerta que se propone, basado en dichos atributos complementa a los programas basados en características estructurales de los ecosistemas y en estudios realizados en otros niveles de organización. Como hemos visto, el sistema representa una herramienta muy adecuada tanto para el seguimiento a escala de red, como a escala de ecosistema. A escala de red, hemos podido detectar, por ejemplo, cómo algunos parques (Picos de Europa, Ordesa y Doñana) están experimentando más cambios en el funcionamiento de los ecosistemas que otros (Monfrágüe), lo que constituye una información muy útil para definir y priorizar políticas y acciones de manejo a esta escala. De forma equivalente, las comparaciones similares a nivel de ecosistema, como las desarrolladas en los robledales de Sierra Nevada, servirían para orientar las acciones de manejo a escala de un parque en concreto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la inestimable colaboración e ideas de José Paruelo, Howard Epstein, Néstor Fernández, Cecilio Oyonarte y Miguel Delibes. Las investigaciones realizadas estuvieron financiadas por los proyectos (Proyecto 066/2007) del Organismo Autónomo Parques Nacionales, y los Fondos FEDER a través del proyecto SEGALERT P09-RNM-5048 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARAZ-SEGURA, D., PARUELO, J., y CABELLO, J. 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 200-212.
- ALCARAZ-SEGURA, D., BALDI, G., DURANTE, P., GARBULSKY, M.F. 2008a. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17 (3): 108-117.
- ALCARAZ-SEGURA, D., CABELLO, J., PARUELO, J.M. y DELIBES, M. 2008b. Trends in the surface vegetation dynamics of the National Parks of Spain as observed by satellite sensors. *Applied Vegetation Science*, 11, 431-440.
- ALCARAZ-SEGURA, D., CABELLO, J. y PARUELO, J.M. 2009a. Baseline characterization of major Iberian vegetation types based on the NDVI dynamics. *Plant Ecology* 202,13e29.
- ALCARAZ-SEGURA, D., CABELLO, J., PARUELO, J.M. y DELIBES, M. 2009b. Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a national park network: a remote sensing approach. *Environmental Management* 43, 38-48.
- ALCARAZ-SEGURA, D., LIRAS, E., TABIK, S., PARUELO, J.M. y CABELLO, J. 2010. Evaluating the consistency of the 1982-1999 NDVI trends in the Iberian Peninsula across four time-series derived from the AVHRR sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors* 10, 1291-1314.
- ARAÚJO, M.B., CABEZA, M., THUILLER, W., HANNAH, L. y WILIAMS, P.H., 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, 10(9), 1618-1626.
- ARRIERO, E., SANZ, J.J. y ROMERO-PUJANTE, M. 2006. Habitat structure in Mediterranean deciduous oak forests in relation to reproductive success in the Blue Tit *Parus caeruleus*: Capsule Effects operate during laying and incubation and with less success in breeding territories characterized by a young and immature vegetation structure. *Bird Study*, Vol.53, No.1, pp. 12-19.
- BEEVER, E.A. y WOODWARD, A. 2011. Design of ecoregional monitoring in conservation areas of high-latitude ecosystems under contemporary climate change. *Biological Conservation*, 144: 1258-1269.
- BOWERS, S. McPHILLIPS, T., LUDAESCHER, B. COHEN, S. y DAVIDSON, S. B. 2006. A Model for User-Oriented Data Provenance in Pipelined Scientific Workflows. In *International Provenance and Annotation Workshop (IPAW)*, LNCS, 2006.
- BRUNET, M., AGUILAR, E., SALADÍE, O., SIGRÓ, J. y LÓPEZ, D. 2001. The Spanish temperature series. Time variations and trends over the last 150 years. *Geophysical Research Abstracts*, 3 (GRA3), 5333-5376.
- CABELLO, J., ALCARAZ-SEGURA, D., FERRERO, R., CASTRO, A.J. y LIRAS, E. 2012a. The role of vegetation and lithology in the spatial and inter-annual response of EVI to climate in dry lands of Southeastern Spain. *Journal of Arid Environments*, 79: 76-83.
- CABELLO, J., FERNÁNDEZ, N., ALCARAZ-SEGURA, D., OYONARTE, C., ALTESOR, A., PIÑEIRO, G., DELIBES, M. y PARUELO, J. 2012b. The ecosystem functioning dimension in conservation biology: insights from remote sensing. *Biodiversity and Conservation*. En prensa.
- CAMARERO, J.J. y GUTIÉRREZ, E. 1999. Structure and recent recruitment at alpine forest-pasture ecotones in the Spanish central Pyrenees. *Ecoscience* 6(3): 451-464.
- CAMARERO, J.J. y 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.
- CAÑADA, R., GALÁN, E., FERNÁNDEZ, F., CERVERA, B., PÉREZ-CUEVA, A., LÓPEZ-BAEZA, E. y TAMAYO, J. 2001. Análisis de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales en la Meseta sur española durante el siglo XX. *El tiempo del clima*. Valencia, Asociación Española de Climatología-Garmas Impresores: 53-63.

- CLARK, J.S., CARPENTER, S.R., BARBER, M., COLLINS, S., DOBSON, A., FOLEY, J.A., LODGE, D.M., PASCUAL, M., PIELKE Jr., R., PIZER, W., PRINGLE, C., REID, W.V., ROSE, K.A., SALA, O., SCHLESINGER, W.H., WALL, D.H. y WEAR, D. 2001. Ecological forecast: an emerging imperative. *Science* 293, 657.
- COSTA, M., MORLA, C. y SAINZ-OLLERO, H. 2005. Los bosques ibéricos: una interpretación geobotánica, Ed. Planeta, ISBN 978-84-08058-20-5, Barcelona.
- COSTANZA, R., NORTON, B.G. y HASKELL, B.D. 1992. *Ecosystem health: New goals for environmental management*. Island Press, Washington DC.
- CONSTANZA, R., D'ARCE, R., GROOT, R., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEIL, R.V., PARUELO, J., RASKIN, R.G., SUTTON, P. y VAN DEN BELT, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.
- DAILY, G. C., ALEXANDER, S., EHRlich, P.R., GOULDER, L., LUBCHENCO, J., MATSON, P.A., MOONEY, H.A., POSTEL, S., SCHNEIDER, S.H., TILMAN, D.G. y WOODWELL, G.M. 1997. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology* 2:1-16.
- DE CASTRO, M., MARTÍN-VIDE, J. y ALONSO, S. 2005. El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. *Impactos del Cambio Climático en España*. pp.64.
- DI BELLA, C.M., REBELLA, C.M. y PARUELO, J.M. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21(4): 791-797.
- DIONISIO, M.A., ALCARAZ-SEGURA, D. y CABELLO, J. 2012. Satellite-Based Monitoring of Ecosystem Functioning in Protected Areas: Recent Trends in the Oak Forests (*Quercus pyrenaica* Willd.) of Sierra Nevada (Spain). In S. S. Young and S. E. Silvertown (eds.) *International Perspectives on Global Environmental Change*. Ed. InTech, pp: 355-374.
- FERNÁNDEZ-DELGADO, C. 2006. Conservation management of a European Natural Area: Doñana National Park, Spain. In: Groom MJ, Meffe GK, Carroll CR (eds) *Principles of conservation biology*. Sinauer Associates, Sunderland, MA, pp 536-543.
- GALÁN, E., CAÑADA, R., RASILLA, D., FERNÁNDEZ, F., CERVERA, B., RASO, J.M. Y MARTÍN-VIDE, J. 1999. Evolución de las precipitaciones anuales en la Meseta meridional durante el siglo XX. *La climatología española en los albores del siglo XXI*. Barcelona, Asociación Española de Climatología Oikos-Tau: 169-180.
- GALÁN, E., CAÑADA, R., FERNÁNDEZ, F., CERVERA, B., BRUNET, M. y LÓPEZ, D. 2001. Annual temperature evolution in the Southern Plateau of Spain from the construction of regional climatic time series. *Detecting and modelling regional climate change*. Berlín, Springer-Verlag: 119-131.
- GARBULSKY, M.F. y PARUELO, J.M. 2004. Remote sensing of protected areas to derive baseline vegetation functioning characteristics. *J Veg Sci* 15:711-720.
- GRUMBINE, R.E. 1994. What is ecosystem management. *Conservation Biology* 8 (1): 27-38.
- HALPIN, P.N. 1997. Global climate change and natural-area protection: Management responses and research directions. *Ecological Applications* 7(3): 828-843.
- HANNAH, L., MIDGLEY, G.F. y MILLAR, D. 2002. Climate change-integrated conservation strategies. *Global Ecology and Biogeography* 11(6): 485-495.
- HEY, T., TANSLEY, S. y TOLLE, K. 2009. *The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery*. Microsoft Research, Redmond, Washington.
- HÓDAR, J. A. y ZAMORA, R. 2004. Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species. *Biodiversity and Conservation* 13(3): 493-500.
- JAX, K. 2010. *Ecosystem Functioning*. Cambridge University Press. pp.272.
- KENNEDY, R.E., TOWNSEND, P.A., GROSS, J.E., COHEN, W.B., BOLSTAD, P., WANG, Y.Q. y ADAMS, P. 2009. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sensing of Environment*, 113(7): 1382-1396.

- LIANG, S. 2000. Narrow band to broad band conversions of land surface albedo I Algorithms. *Remote Sensing of Environment* 76:213–238.
- LINDEMAYER, D.B. y LIKENS, G.E. 2010. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation* 143: 1317-1328.
- LINDEMAYER, D.B., LIKENS, G.E., HAYWOOD, A. y MIEZIS, L. 2011. Adaptive monitoring in the real world: proof of concept. *Trends in Ecology and Evolution*, Vol. 26 (12): 641-646.
- LIRAS, E. 2010. Funcionamiento ecosistémico: Controles y patrones espacio-temporales en el SE Ibérico. Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Almería, Universidad de Almería. PhD dissertation, Editorial Universidad de Almería, Almería, Spain.
- LUDWIG, J.A., TONGWAY, D.J., BASTIN, G.N. y JAMES, C.D. 2004. Monitoring ecological indicators of rangeland functional integrity and their relation to biodiversity at local to regional scales. *Austral Ecology* 29(1):108–120.
- MALINGREAU, J.P. 1986. Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 7(9): 1121-1146.
- MARGULES, C.R. y PRESSEY, R.L. 2000. Systematic conservation planning. *Nature* 405 (6783):243–253.
- McNAUGHTON, S., OESTERHELD, M., FRANK, D.A. y WILLIAMS, K.J. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341, 142 – 144.
- MICHENER, W.K. y JONES, M.B. 2012. Ecoinformatics: supporting ecology as a data-intensive science *Trends in Ecology and Evolution* 27(2) 85-93.
- MILCHUNAS, D.G. y LAUENROTH, W.K. 1995. Inertia in plant community structure: state changes after cessation of nutrient Enrichment stress. *Ecol Appl* 5:1195–2005.
- MONTEITH, J. y WEBB, C., 1981. Soil-Water and Nitrogen in Mediterranean-Type Environments - Introduction. *Plant and Soil*, 58(1-3): R5-R6.
- MYNENI, R.B., KEELING, C.D., TUCKER, C.J., ASRAR, G. y NEMANI, R.R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386: 698-702.
- PARUELO, J.M., PIÑEIRO, G., OYONARTE, C., ALCARAZ, D., CABELLO, J. y ESCRIBANO, P. 2005. Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas of Southeastern Spain. *Applied Vegetation Science* 8: 93-102.
- PARUELO, J.M., EPSTEIN, H.E., LAUENROTH, W.K. y BURKE, I.C. 1997. ANPP Estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78(3): 953-958.
- PELKEY, N.W., STONER, C.J. y CARO, T.M. 2003. Assessing habitat protection regimes in Tanzania using AVHRR NDVI composites: comparisons at different spatial and temporal scales. *International Journal of Remote Sensing*, 24(12): 2533-2558.
- PENNINGTON, W. 1986. Lags in adjustment of vegetation to climate caused by the pace of soil development: evidence from Britain. *Vegetatio* 67:105-118.
- PEÑUELAS, J. y BOADA, M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9(2): 131-140.
- PETTORELLI, N., VIK, J.O., MYSTERUD, A., GAILLARD, J.M., TUCKER, C.J. y STENSETH, N.C., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 503-510.
- POTTER, C. S., RANDERSON, J. T., FIELD, C. B., MATSON, P. A., VITOUSEK, P. M., MOONEY, H. A., et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles* 7: 811–841.
- RODÓ, X., COMÍN, F., ZAMORA, R. y PUGNAIRE, F.I. 2001. Fluctuaciones del clima mediterráneo: conexiones globales y consecuencias regionales. Aspectos funcionales de los ecosistemas mediterráneos. Granada, Spain, CSIC-AEET: 1-36.
- RUNNING, S.W., THORNTON, P.E., NEMANI, R.R. y GLASSY, J.M. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. *Methods in ecosystem science* (ed. by O.E. Sala, R.B. Jackson, H.A. Mooney and R.W.Howarth), pp. 44–57. Springer-Verlag, New York.

- SERRA, C., BURGUEÑO, A. y LANA, X., 2001. Analysis of maximum and minimum daily temperatures recorded at Fabra observatory (Barcelona, NE Spain) in the period 1917-1998. *International Journal of Climatology* 21(5): 617-636.
- STAUDI, M., 2004. Detección de cambios térmicos en la Península Ibérica con datos homogéneos regionales, Universidad de Granada: 559.
- STOMS, D.M. y HARGROVE, W.W. 2000. Potential NDVI as a baseline for monitoring ecosystem functioning. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 401-407.
- TUCKER, C.J., PINZON, J.E., BROWN, M.E., SLAYBACK, D.A., PAK, E.W., MAHONEY, R., VERMOTE, E.F. y EL SALEOUS, N. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *Int. J. Remote Sens.* 26: 4485-4498.
- TURNER, W., SPECTOR, S., GARDINER, N., FLADELAND, M., STERLING, E. y STEININGER, M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 18: 306-314.
- VALLADARES, F., ARIANOUTSOU, M. y PAPANASTASIS, V. 2004. Global Change and radiation in Mediterranean forest ecosystems: a meeting point for ecology and management. *Ecology, conservation and sustainable management of Mediterranean type ecosystems of the World*. Rotterdam, Millpress: 1-4.
- VICENTE-SERRANO, S.M. y HEREDIA-LACLAUSTRÁ, A. 2004. NAO influence on NDVI trends in the Iberian Peninsula (1982-2000). *International Journal of Remote Sensing* 25:2871-2879.
- VIRGINIA, R. y WALL, D. 2001. Principles of ecosystem function, In: *Encyclopedia of biodiversity*, Levin SA, (Ed.), 345-352, Academic Press, ISBN 0122268652, San Diego, USA.
- VOGELMANN, J.E., TOLK, B. y ZHU, Z. 2009. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 113 (8) 1739-1748, ISSN 0034-4257.
- WANG, Q., TENHUNEN, J., DINH, N.Q., REICHSTEIN, M., VESALA, T. y KERONEN, P. 2004. 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.
- YAFFEE, S.L. 1999. Three faces of ecosystem management. *Conservation Biology* 13(4): 713-725.
- ZORN, P., STEPHENSON, W. y GRIGORIEV, P. 2001. An ecosystem management program and assessment process for Ontario national parks. *Conservation Biology* 15 (2): 353-362.