

Guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales

2012



Este documento constituye la Guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales, que forma parte de la “*Encomienda de gestión para la dotación del Plan Piloto de Seguimiento y Evaluación y Programa de Investigación de la Red de Parques Nacionales*”, según lo establecido en el “*Informe para el 2º modificado de la “Encomienda de gestión para la dotación del Plan Piloto de Seguimiento y Evaluación y Programa de Investigación de la Red de Parques Nacionales”*”. Esta encomienda fue encargada por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (OAPN) a Tragsa con fecha 22 de octubre de 2009.

Dirección OAPN	Jesús Serrada Hierro Lucía Ramirez Sanz Jorge Bonache López
Coordinación OAPN	Pablo Castillo García Gloria de Mingo-Sancho García
Coordinación TRAGSATEC	Marta Chicharro Alique Beatriz Mesa León Carlos Moreno de Guerra Per
Redacción y asesoramiento científico	Javier Cabello Piñar, <i>Centro Andaluz para la Evaluación del Cambio Global (Universidad de Almería)</i> Domingo Alcaraz-Segura, <i>Centro Andaluz para la Evaluación del Cambio Global (Universidad de Almería)</i> Patricia Lourenço, <i>Centro Andaluz para la Evaluación del Cambio Global (Universidad de Almería)</i> Andrés Reyes, <i>Centro Andaluz para la Evaluación del Cambio Global (Universidad de Almería)</i>

ÍNDICE

1	Introducción.....	6
1.1	El uso de la teledetección para el seguimiento del funcionamiento ecosistémico	6
1.2	Antecedentes a la propuesta: el prototipo Monparq.....	7
1.3	Objetivo del pedido y características técnicas de los trabajos a realizar	8
2	Características del sistema de seguimiento.....	9
2.1	Requisitos para su diseño y arquitectura	9
2.2	El sistema se sustentará sobre cuatro pilares básicos.....	11
2.2.1	<i>Relación entre los índices espectrales y la salud de los ecosistemas</i>	<i>11</i>
2.2.2	<i>Estimación de atributos descriptores del funcionamiento ecosistémico a partir de la parametrización de la curva anual de índices espectrales de vegetación: indicadores para el seguimiento</i>	<i>13</i>
2.2.3	<i>Caracterización de las condiciones de referencia frente a las que evaluar los cambios</i>	<i>14</i>
2.2.4	<i>Estimación de tendencias de cambio</i>	<i>16</i>
2.3	Alcance del sistema de seguimiento	17
2.3.1	<i>Niveles de estudio y serie temporal</i>	<i>17</i>
2.3.2	<i>Sistema de Seguimiento y Alerta</i>	<i>17</i>
2.4	Configuración general y niveles de desarrollo del sistema	17
3	Preguntas de gestión y productos para la visualización y consulta	19
3.1	Trabajando con preguntas.....	19
3.2	Productos de visualización	23
4	El producto MOD13Q1 y su aplicación al seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas de la Red de PPNN de España.....	41
5	Procesamiento de los datos y arquitectura del sistema	45
5.1	Adquisición de los datos.....	45
5.1.1	<i>Adquisición de los datos de la imagen: descarga y actualización de las imágenes</i>	<i>45</i>
5.1.2	<i>Adquisición de los datos de referencia: caracterización ecológica de los píxeles</i>	<i>46</i>
5.2	Pre-procesado de la imagen	49
5.2.1	<i>Filtrado por calidad.....</i>	<i>49</i>
5.2.2	<i>Relleno de huecos en la serie temporal</i>	<i>54</i>
5.3	Cálculo de los atributos que se emplearán como indicadores del funcionamiento ecosistémico: condiciones de referencia.....	54
5.4	Estimación de tendencias	56
5.5	Detección de anomalías temporales y alertas tempranas	58

5.5.1	<i>Detección de anomalías temporales</i>	58
5.5.2	<i>Detección de alertas tempranas</i>	59
5.5.3	<i>Evaluación de la relevancia de las alertas tempranas</i>	59
5.6	Reproyección y mosaico.....	60
5.6.1	<i>Reproyección</i>	60
5.6.2	<i>Mosaico</i>	61
5.7	Extracción de la información de la imagen y construcción de una base de datos.....	61
5.7.1	<i>Extracción de información de la imagen</i>	61
5.7.2	<i>Integración de la información en una base de datos (PostgreSQL)</i>	62
5.8	Detección de anomalías espaciales.....	62
6	Gestión del flujo de trabajo.....	65
7	Integración en visor cartográfico y plataforma de seguimiento.....	67
8	Operatividad y requerimientos técnicos y económicos del sistema de seguimiento y alerta.....	69
8.1	Necesidades de software, hardware y almacenamiento en el OAPN.....	69
8.1.1	<i>Software</i>	69
8.1.2	<i>Lenguajes de programación</i>	70
8.2	Necesidad de hardware y almacenamiento.....	72
9	Política de visualización y difusión de los datos.....	73
9.1	Política de difusión de datos.....	73
9.2	Descarga de datos.....	73
10	Alternativas de desarrollo y coste.....	75
11	Bibliografía.....	77
Anexo I: PROPUESTA TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA BÁSICO DE SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE LA VEGETACIÓN CON DATOS MODIS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA COMO APOYO AL PLAN DE SEGUIMIENTO EXTENSIVO DE LA RED DE PP.NN. DURANTE EL PERIODO 2012/13.....		
1	Objetivos.....	83
2	Datos de partida.....	83
3	Desarrollo metodológico.....	83
4	Cronograma.....	88
5	Presupuesto.....	88

Anexo II: Presentación de la guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales de España89

1 Introducción

El siguiente documento constituye la Guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales. El cuerpo del documento desarrolla la metodología desarrollada por el grupo de trabajo de la Universidad de Almería, fruto de los trabajos realizados en el marco del Plan Piloto de Seguimiento y Evaluación y del Programa de Investigación de la Red de Parques Nacionales. El anexo I incorpora la propuesta de Tragsatec para la puesta en práctica de esta metodología, mientras que el anexo II incorpora la presentación realizada por el grupo de trabajo de la Universidad de Almería para explicar la metodología propuesta.

1.1 El uso de la teledetección para el seguimiento del funcionamiento ecosistémico

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 estos 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 que la escala a la que operan los agentes de cambio y sus efectos excede 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, 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, Cabello y otros 2012a).

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 los ecosistemas a través del empleo de IV e indicadores de la productividad, estacionalidad y fenología. A lo largo del proyecto hemos adquirido conocimiento en relación a las condiciones de referencia del funcionamiento de los parques nacionales españoles y sus controles ambientales y a 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 hemos desarrollado una propuesta de Sistema de Seguimiento y Alerta basado en el análisis del funcionamiento ecosistémico y válido para toda la Red de Parques Nacionales. La guía que presentamos aquí constituye la descripción de los pasos que habría que dar para el desarrollo del modelo operacional que sustentaría dicho programa de seguimiento.

1.2 Antecedentes a la propuesta: el prototipo Monparq

El sistema de seguimiento que se propone está basado en el sistema MonParq, un prototipo de plataforma informática diseñado para proporcionar a los gestores de los parques nacionales información histórica y actual sobre el funcionamiento de los ecosistemas, ayudándole a evaluar el estado de salud de éstos. Está basada en una aproximación “funcional” a la Biología de la Conservación y en la evaluación de porciones de territorio coincidentes con píxeles de imágenes satelitales. MonParq fue desarrollada dentro del proyecto de investigación “*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*” financiado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales (2007-2010), cuyo investigador principal fue el Dr. Javier Cabello.

Esta plataforma aprovecha el potencial de la teledetección, almacenando datos de los índices de vegetación EVI (*Enhanced Vegetation Index*) y NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) periódicamente, de tal forma, que se mantenga actualizado el comportamiento de los distintos ecosistemas que componen el área protegida. Esto permite identificar tendencias, anomalías temporales y anomalías espaciales en los ecosistemas utilizando el píxel como unidad de referencia espacial. Monparq proporciona información útil para la priorización de las actuaciones de gestión y para retroalimentar la gestión adaptativa ya que 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 manejo, 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 et al., 2001).

1.3 Objetivo del pedido y características técnicas de los trabajos a realizar

El objeto del presente pedido es la elaboración de un documento guía para el diseño de un sistema que incorpore la teledetección al seguimiento ecológico de la Red de Parques Nacionales. El sistema se basará en el empleo de datos de observación de la Tierra del sensor MODIS, y coincide en sus objetivos con los del prototipo MonParq. No obstante, su diseño pretende superar las limitaciones de éste prototipo que fue construido sobre software privativo, con módulos en código cerrado, y sin un gestor automático y sistemático de flujos de trabajo.

La presente propuesta se nutre de los aciertos y desaciertos cometidos en MonParq y nace con la intención de estar 100% basada en software de código abierto y licencia pública, de ser fácilmente actualizable y de estar en permanente crecimiento incorporándole nuevas funcionalidades y módulos.

Este documento estratégico deberá ayudar a determinar los objetivos específicos, el alcance, la instrumentación y el presupuesto necesario para incorporar en un plazo de 2 años, la teledetección al Plan de Seguimiento ecológico de la Red de Parques Nacionales.

El documento trata las opciones, estrategias y rutinas que serían necesarias para desarrollar los siguientes subsistemas que integrarán la plataforma:

- 1) Descarga y actualización de las imágenes,
- 2) Filtrado por calidad,
- 3) Caracterización funcional,
- 4) Detección de anomalías temporales,
- 5) Detección de tendencias,
- 6) Detección de anomalías espaciales,
- 7) Generación y priorización de alertas,
- 8) Reproyección y mosaico.
- 9) Productos generados para la visualización y consultas

Además se detallarán cuestiones como: indicadores de seguimiento que se obtendrán, eficacia y alternativas de desarrollo y coste, lenguaje de programación, integración en visor cartográfico y plataforma de seguimiento, necesidades de hardware y software, y almacenamiento en el OAPN, robustez de las soluciones y facilidad de mantenimiento y ampliación.

El documento incorpora a modo de resultado final, la propuesta de tres opciones: básica, media y avanzada, de análisis de las imágenes de satélite para el seguimiento ecológico, garantizando que para cada una de ellas se genera información útil para el seguimiento.

2 Características del sistema de seguimiento

2.1 Requisitos para su diseño y arquitectura

La herramienta que se propone implementar será un sistema web cuyo diseño y arquitectura deberán estar guiados por los siguientes requisitos:

1) Debe estar orientado a la gestión

Actualmente comienzan a proliferar los sistemas de seguimiento ecológico basados en la adquisición de información para evaluar el estado y tendencia de la estructura y el funcionamiento de las poblaciones, comunidades y ecosistemas a lo largo del tiempo. Sin embargo, aunque dichos sistemas son diseñados con el propósito de evaluar y dirigir acciones de manejo y bajo la formulación de objetivos específicos, en pocos casos la recogida y visualización de los datos que se generan está articulada alrededor de preguntas concretas de gestión. Este es un paso que se suele asumir de manera implícita, sin embargo, no debiera omitirse para favorecer su uso, y la potencialidad del sistema.

De esta forma el diseño de la herramienta se ha planteado a partir de los productos de visualización que se prevén y que permiten ilustrar preguntas básicas relacionadas con la gestión de los ecosistemas. La aplicación no sólo deberá permitir la evaluación de los efectos de los cambios ambientales, sino también evaluar la eficiencia de las prácticas de manejo y restauración, dos aspectos clave del manejo adaptativo.

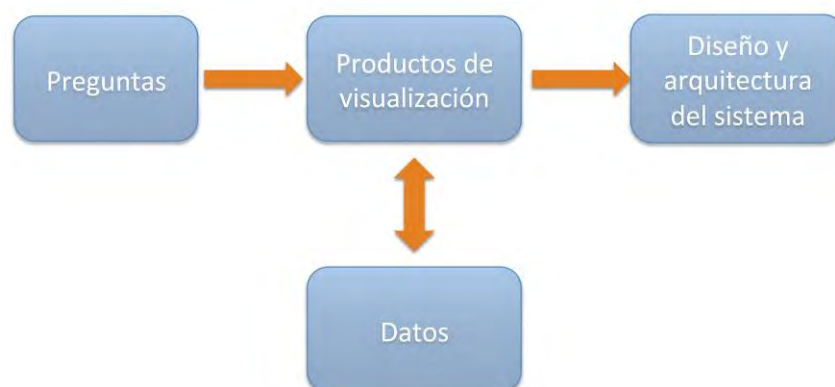


Figura 2.1. Mapa conceptual para el diseño de la herramienta de seguimiento.

2) Debe ser concebida como una herramienta “viva” y permitir un seguimiento global y abierto a la sociedad

La ciencia de la Ecología evoluciona rápidamente y está cambiando cada vez más, hacia una ciencia más abierta, responsable con la sociedad, interdisciplinar, colaborativa, y basada en la generación de una gran cantidad de datos (Michener et al., 2012). En relación con esta evolución, descubrir, integrar y analizar cantidades masivas de datos de distinta procedencia es ya un tema central del análisis medioambiental y de los programas de seguimiento. De hecho, se ha postulado 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 et al., 2009). Su llegada permitirá abordar cuestiones a gran escala y de relevancia tanto científica como social para responder a los problemas globales.

Ante tal desafío es evidente que es necesario el desarrollo de herramientas ecoinformáticas que concebidas como “entes vivos”, puedan crecer y mejorar en respuesta a las necesidades de gestión, a los avances científicos y a la disponibilidad de nuevas tecnologías (Michener et al., 2012). Éste es el enfoque que están adoptando las plataformas internacionales más avanzadas como LTER, DataONE o el

Open Geospatial Consortium (OGC). En nuestro caso, la herramienta que se pretende desarrollar deberá ser receptiva a la ampliación con futuros módulos, que permitan incorporar tanto otros productos de teledetección, como la conexión con múltiples bases de datos procedentes de programas de seguimiento particulares (e.g., OAPN). La manera más efectiva de alcanzar estos objetivos (e.g., ciencia abierta a la sociedad global y diseño de herramientas vivas) solo será posible mediante el uso de software libre y de código abierto, y mediante la provisión de datos abiertos, aunque con diferentes niveles de permiso para su consulta de acuerdo con las responsabilidades de los usuarios. Una primera ventaja de esta forma de diseño es que el sistema podrá ser extendido a otras áreas y enriquecerse de la experiencia en su uso en otros lugares y con otros equipos.

3) Deberá contar con un flujo de trabajo científico transparente

Los beneficios de contar con procesos científicos reproducibles son enormes en áreas donde la investigación se aplica a temas de importancia social. Ejemplos, como el del “Climategate” de la Universidad de East Anglia (http://en.wikipedia.org/wiki/Climatic_Research_Unit_email_controversy) demuestran el impacto negativo que pueden tener los procesos científicos que no son suficiente claros (Bowers et al., 2006). Hasta hace poco los esquemas de funcionamiento con fases que mantenían un cierto nivel de encriptamiento resultaban casi obligados, ya que los datos eran recogidos manualmente a través de procesos laboriosísimos que hacían inevitable un procesamiento de los datos difícilmente transferible. En la actualidad el uso de “flujos de trabajo científico” proporciona 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 (Tabla 2.1). Los flujos de trabajo científico son capaces de:

- manejar un complejo conjunto de análisis y modelos a través de una comunicación sencilla e intuitiva,
- automatizar el proceso con la frecuencia que sea estimada para informar automáticamente a los gestores cuando haya disponible un nuevo análisis,
- proporcionar un trazado completo del manejo de los datos que liga inequívocamente las versiones exactas de datos usados para el análisis, con los procedimientos analíticos ejecutados, y los resultados de salida. Esta capacidad de “reproducibilidad” de todo el proceso 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.

Característica	Descripción
Interfaz	El “diseño” del flujo de trabajo debe ser intuitivo y el entorno de ejecución debe estar dirigido hacia el usuario final.
Reutilización	Los componentes deben ser reutilizables e intercambiables, en particular, los flujos de trabajo deben ser capaces de agregar/ quitar los nuevos procesos de forma dinámica.
Transformación de datos	Debe ser lo suficientemente flexible como para permitir el procesamiento consecutivo de datos entre las actividades de un proceso.
Interacciones y procesamiento por lotes	Debe soportar “ <i>process steering</i> ” (reproducción, pausa y parada) durante la ejecución de un proceso. Debe tener capacidad de monitorear un proceso en tiempo de ejecución, incluso si se está ejecutando en segundo plano.
Streaming (aplicación parcial)	Debe soportar flujos de datos (de moderados a intensos)
Localidad	Debe soportar el procesamiento local y el flujo de trabajo distribuido
Interoperabilidad	Debe apoyar los cambios en la descripción del flujo de trabajo (recogida de datos y sistemas de análisis)
Complejidad	Debe ser capaz de manejar flujos de datos complejos, controles y eventos.
Desempeño y planificación	Debe ser capaz de informar el rendimiento y los costos de ejecución. También debe ser capaz de recoger datos de diferentes

Característica	Descripción
	procesos y hacer uso de indicadores con el fin de predecir cuáles serán los tiempos de ejecución.
Dependencia	Debe estar asociado a un sistema de gestión fiable, de alta disponibilidad y tolerante a fallos.
Verificación y Validación	Debe verificar y validar la construcción o importación de los flujos de trabajo.
Cambios dinámicos	La definición del flujo de trabajo es una actividad dinámica, esta influida por los resultados intermedios, por lo que el flujo de trabajo puede ser cambiado en sus flujos de ejecución
Modelado y simulación	Deben apoyar las medidas que permiten a los científicos simular y modelar las condiciones experimentales

Tabla 2.1. Principales características en flujos de trabajo científicos (Bowers et al. 2006)

2.2 El sistema se sustentará sobre cuatro pilares básicos

Los programas de seguimiento basados en la evaluación del funcionamiento ecosistémico son el resultado del avance científico en la teoría ecológica y de las necesidades de gestión que vienen surgiendo desde los trabajos de Aldo Leopold en Yellowstone, que vienen incorporándose progresivamente a las directrices internacionales (e.g., Convenio de Río o la Directiva Hábitats y la Directiva Marco de Aguas). A pesar de estos avances y de lo intuitivo que resulta el concepto de funcionamiento ecosistémico en relación con la gestión, su aplicación resulta muy compleja, y aún está sometida a debate científico (Jax, 2010). Por fortuna, la teledetección representa una buena aproximación para ello (Cabello et al., 2012b) en la medida en que puede atender a cuatro cuestiones básicas para cualquier programa de seguimiento. Estos cuatro pilares básicos deberán guiar en todo momento el desarrollo de la herramienta, y son:

- 1) Los índices espectrales derivados de imágenes de satélite permiten evaluar, de una forma indirecta, la salud de los ecosistemas.
- 2) La parametrización de la curva anual de los índices de vegetación espectrales permite derivar atributos o indicadores de tres factores clave del funcionamiento de los ecosistemas: productividad, estacionalidad y fenología.
- 3) A través de estos atributos se pueden establecer las condiciones de referencia frente a las que evaluar los cambios que se producen.
- 4) El análisis de largas series temporales permite identificar tendencias de cambio direccionales, lo que resulta enormemente útil bajo la perspectiva del cambio global.

2.2.1 Relación entre los índices espectrales y la salud de los ecosistemas

Los conceptos de salud e integridad del ecosistema están íntimamente relacionados y han sido desarrollados como respuesta a las limitaciones que las metodologías tradicionales (listas de especies, parámetros físicos o químicos) presentan ante la evaluación de las condiciones en las que se encuentra un ecosistema. La idea que subyace a ambos conceptos, es la de contar con una visión holística del estado de los sistemas ecológicos que permita trascender a los resultados que provienen de medir variables parciales. Aunque ambos conceptos presentan un gran nivel de ambigüedad en su evaluación, sin embargo, están ampliamente incorporados a la normativa ambiental, resultan muy intuitivos para los ciudadanos, y siguen siendo usados por el colectivo científico.

Una forma de avanzar en la evaluación de la salud e integridad de los ecosistemas a escala regional a través de descriptores integradores del funcionamiento del ecosistema como la productividad primaria (Figura 2.2.). Considerando la relación existente entre los índices de vegetación espectrales y este parámetro a través del modelo de Monteith (Monteith, 1972), podemos considerar que el sistema de seguimiento atiende a la necesidad de informar sobre el estado de los ecosistemas, y poner éste en

relación a los conceptos de salud e integridad ecosistémica. De hecho, las investigaciones ecológicas basadas en el NDVI (o en el EVI) constituyen una valiosa aproximación como apoyo a la gestión de la naturaleza (Turner et al., 2003), y en el estudio de las respuestas ecológicas frente a los cambios ambientales (Pettorelli et al., 2005). Esto último es especialmente importante por su aplicación a los estudios del impacto del cambio climático sobre los ecosistemas.

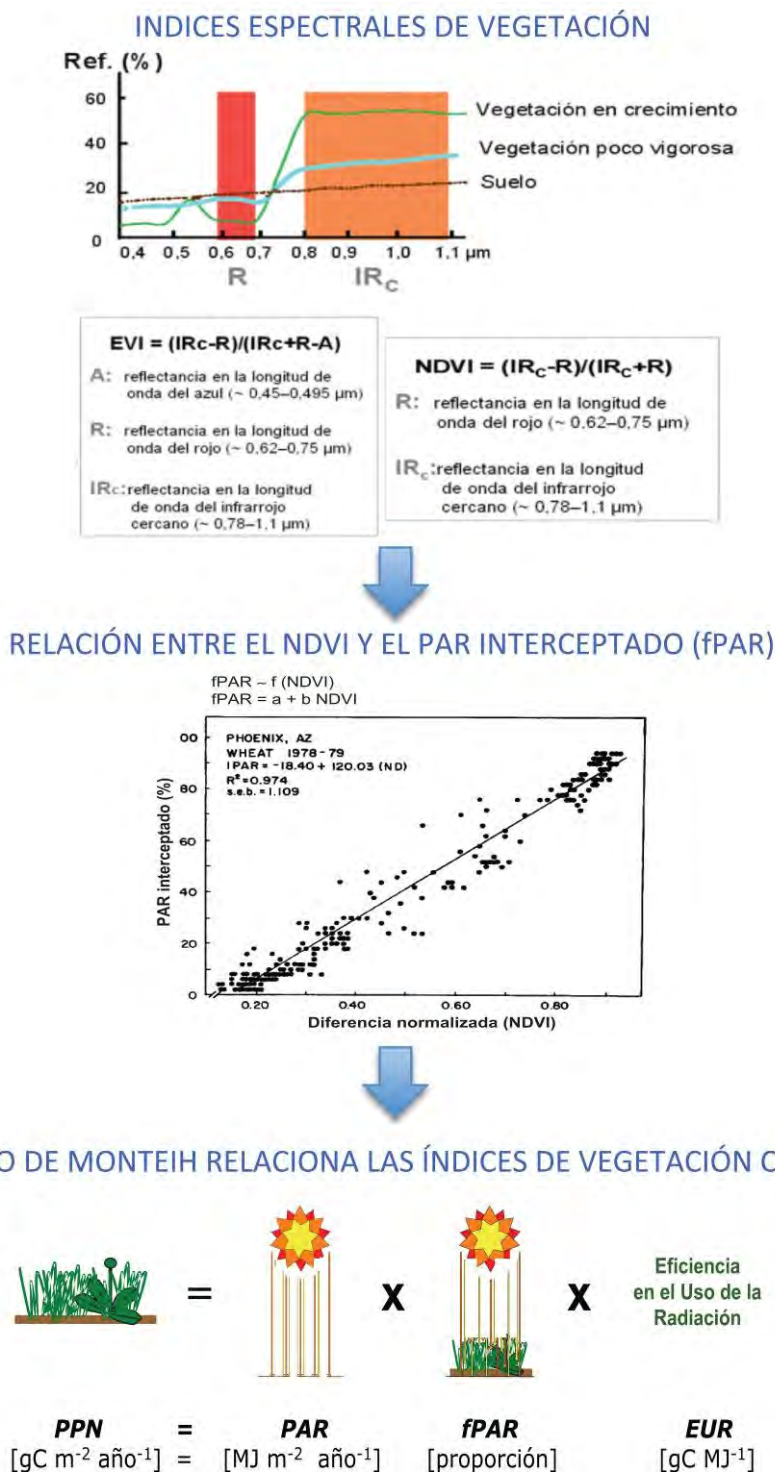


Figura 2.2. El comportamiento diferencial de la cubierta vegetal en relación a la reflectancia en el rojo e infrarrojo cercano permite la estimación de índices de vegetación espectrales que muestran una relación directa con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fPAR), un parámetro que determina la productividad primaria neta, un descriptor integrador del funcionamiento ecosistémico.

2.2.2 Estimación de atributos descriptores del funcionamiento ecosistémico a partir de la parametrización de la curva anual de índices espectrales de vegetación: indicadores para el seguimiento

El sistema se basará en el empleo de imágenes de satélite MODIS que proveen información espectral cada 16 días. Esta frecuencia de provisión de datos permite la construcción de una curva anual que describe el comportamiento de los píxeles (porciones de territorio correspondientes a una ecosistema) de una manera dinámica a lo largo de un año (Figura 2.3).

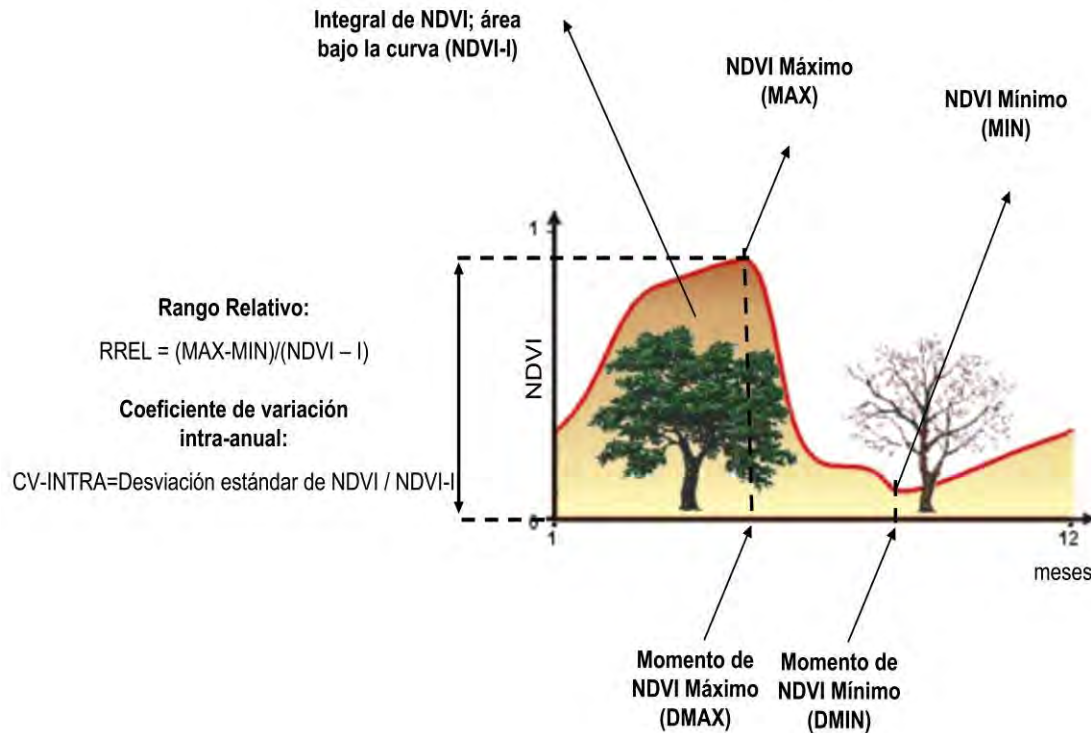


Figura 2.3. Curva anual del NDVI y sus atributos derivados (fuente de la imagen: G. Baldi, Iniciativa Lechusa; lechusa.unsl.edu.ar).

A partir de la parametrización de esta curva se pueden derivar varios índices cuyo valor como indicador ambiental significado biológico ya ha sido suficientemente contrastado dado su significado biológico (Pettorelli et al., 2005), y que representan diferentes aspectos del funcionamiento ecosistémico con se puede ver en la siguiente tabla (Tabla 2.2.).

Atributo	Tipo de medida	Definición	Significado biológico	Comentarios	Fuente
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)	Tucker et al. (1985)
Máximo NDVI	Productividad total y biomasa	Máximo NDVI en el año	Productividad anual de la vegetación	Sensible a falsos picos y 'ruido'	Paruelo & Lauenroth(1998)
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"	Guerschman et al. (2003)
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'	Paruelo & Lauenroth(1998)

Atributo	Tipo de medida	Definición	Significado biológico	Comentarios	Fuente
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)	Reed et al. (1994)
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'	Ludekeet al. (1996)
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'	Paruelo et al. (2001b), Guerschman et al. (2003)

Tabla 2.2. Atributos derivados de la curva estacional del NDVI y sus características. Adaptado de Pettorelli et al. (2005)

2.2.3 Caracterización de las condiciones de referencia frente a las que evaluar los cambios

El concepto de funcionamiento ecosistémico significa diferentes cosas para diferentes personas, hasta el punto de que podemos hablar de “jungla terminológica” en su concepción. A pesar de ello, podemos reconocer dos formas básicas de entender el funcionamiento ecosistémico que a menudo se presentan conectadas entre sí (Jax, 2010): 1) el funcionamiento ecosistémico como referencia a algunos procesos (o incluso propiedades) que tienen lugar en un ecosistema, 2) el funcionamiento ecosistémico concierne a la representación del sistema completo.

Evaluar el estado del ecosistema de acuerdo con estas definiciones no resulta sencillo, especialmente porque se puede decir que cualquier ecosistema por el mero hecho de existir, funciona. Una forma de solventar este problema es a través del establecimiento de unas “condiciones de referencia” (*baseline conditions*) del funcionamiento de los ecosistemas y de su variabilidad interanual (Jax, 2010). Una condición o estado de referencia se define como aquella condición de un sistema frente a la que otro sistema, o el mismo pero en otro momento, es comparada (Jax, 2010). Generalmente es una condición que es considerada como “normal” o “deseable” (Figura 2.4.).

Las condiciones de referencia pueden ser derivadas de muchas maneras diferentes, tanto a partir de un estado o sistema similar (a menudo asumido como “natural”), como mediante datos históricos, procesos de modelización o por la estipulación de una condición deseable desde un punto de vista socio-político. Además, puesto que los sistemas ecológicos raramente se encuentran en condiciones de equilibrio, los estados de referencia nunca pueden ser definidos con la precisión que se podría hacer sobre la base de la tecnología actual, sino que hay considerar alguna varianza alrededor de ellas.

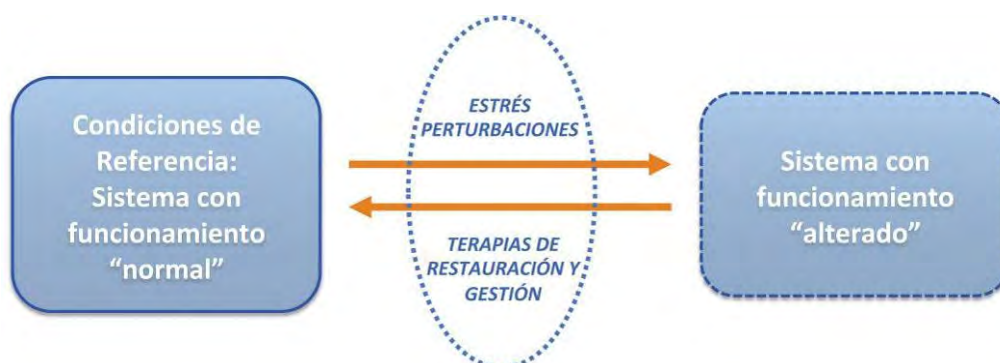


Figura 2.4. El establecimiento de condiciones de referencia es un paso previo a la evaluación del estado del funcionamiento ecosistémico.

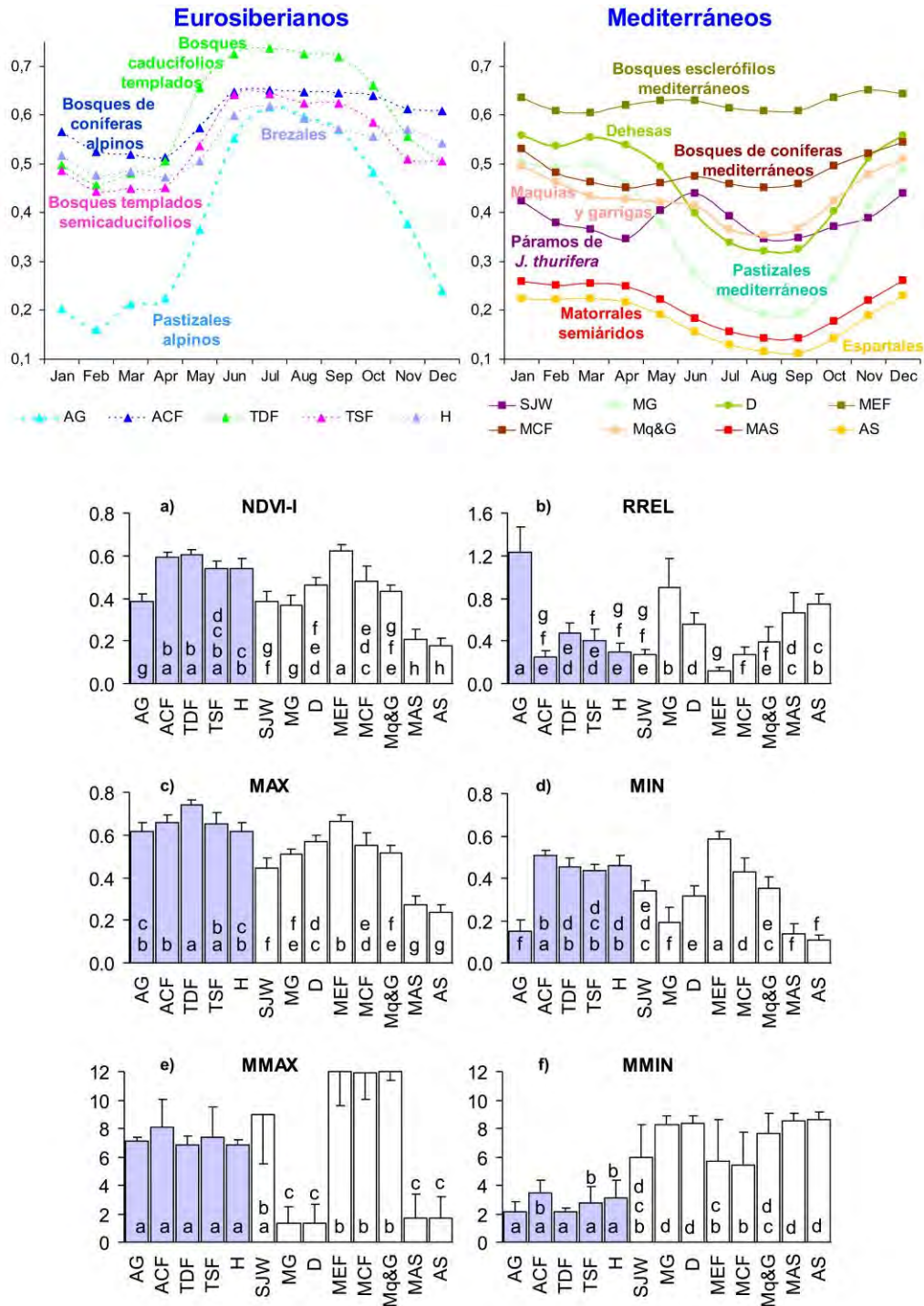


Figura 2.5. Caracterización de las condiciones de referencia a partir del empleo de atributos funcionales derivados de imágenes de satélite. A) Curva anual de NDVI en distintos tipos de vegetación de la Península Ibérica. Cada punto representa el valor medio de todos los píxeles de un mismo tipo de vegetación durante un periodo de 18 años. B) Caracterización funcional de distintos tipos de vegetación en la Península Ibérica según su valor de NDVI medio anual (a), rango relativo anual (b), máximo y mínimo de NDVI en el año medio (c, d), y meses del máximo y mínimo valor de NDVI (e, f). Las líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar de cada atributo de NDVI. Ver Alcaraz-Segura et al. (2009b) para una descripción de las abreviaturas utilizadas.

Una de las ventajas del sistema que se propone es que permite caracterizar de estas condiciones de referencia, ya que la curva media anual del comportamiento de los ecosistemas y la estimación de atributos relacionados con la productividad primaria, la estacionalidad y la fenología (Figura 2.5.) resulta del registro de datos a lo largo de una serie temporal importante, y a través de la observación a escala regional. 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 sean estáticas, cumpliendo con otro de los requisitos de las condiciones de referencia, como es el de ser expresadas mediante referencias dinámicas, esto es, referidas a trayectorias (circulares o lineares) (e.g., sucesionales) que se espera que sigan los ecosistemas.

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. Las primeras se referirán a las localizaciones en las que un ecosistema o hábitat, muestran un comportamiento fuera de las medidas centrales (e.g., media \pm desviación estándar) de un atributo funcional, y servirán para mostrar localidades en las que los ecosistemas tienen un comportamiento diferencial (cuyas causas podrán ser investigadas a través de estudios de campo). Las anomalías pueden ocurrir en cualquier lugar y pueden ser causadas por la influencia directa o indirecta de los factores naturales o la intervención humana. Pueden registrarse a partir de las imágenes de satélite. Otra forma de referirse a las anomalías puede ser a través de los términos outlier, excepciones, peculiaridades, sorpresas, etc. A priori, estas anomalías no deben ser interpretadas como impactos negativos sobre el ecosistema, sino que más bien, como una pista para identificar los factores que están induciendo tal comportamiento, y cuyas causas podrán ser investigadas a través de estudios de campo. Las anomalías temporales se pueden establecer tomando como referencia el comportamiento del píxel/ecosistema en años anteriores. De este modo, se puede evaluar de forma rápida y continua el “estado de salud” de un ecosistema en relación a su comportamiento histórico medio. Un ejemplo de aplicación de la identificación de anomalías puede ser la evaluación de la tensión del dosel durante períodos de sequía.

2.2.4 Estimación de tendencias de cambio

La posibilidad de contar con series temporales de datos permitirá al sistema determinar la existencia de tendencias, esto es, la existencia de cambios direccionales en el tiempo. El protocolo que se propone pretende describir los patrones espacio-temporales de los diferentes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas de los parques nacionales de España y su respuesta a los cambios ambientales entre siempre que posible de 2000 hasta la actualidad.

Se define como tendencia la existencia de una trayectoria persistente en los valores del índice o los atributos funcionales a los largo del período de estudio. Estas tendencias pueden estar en relación con perturbaciones perfectamente visibles que induzcan 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 et al., 2009).

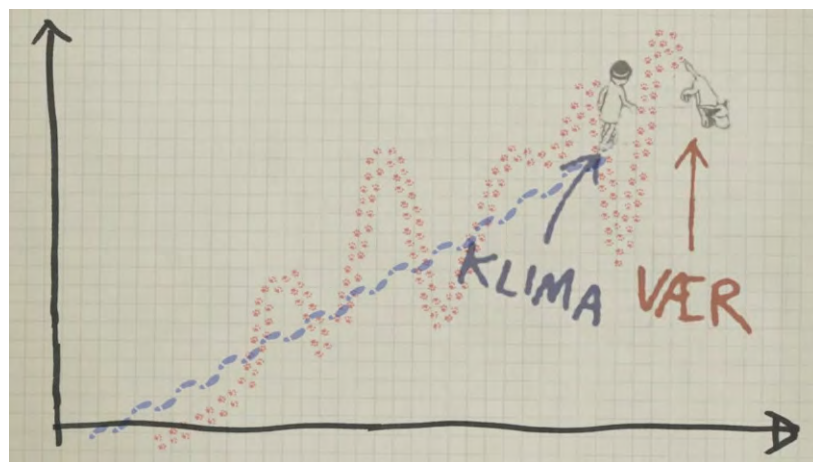


Figura 2.6. El empleo de series temporales permite al sistema identificar cambios direccionales en el tiempo. En la figura el perro (VAER) describe una trayectoria variable y aparentemente errática a la que subyace una dirección determinada por el dueño (KLIMA). http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=e0vj-0imOLw

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 et al., 2009), permitiendo la identificación temprana de procesos que afectan al

funcionamiento del ecosistema. De esta forma el gestor puede anticipar su repuesta y adaptar sus estrategias de manejo cuando aún los cambios no sean irreversibles.

La obtención periódica de estos mapas, en nuestro caso cada 16 días, facilita el análisis de la dinámica de estos parámetros, y por tanto, el monitoreo de la productividad de la vegetación.

2.3 Alcance del sistema de seguimiento

2.3.1 Niveles de estudio y serie temporal

El sistema permite abordar todas las escalas espaciales en las que se enmarcan los ecosistemas terrestres de España. Puesto que el procesamiento de las imágenes se hace para el mosaico entero de las escenas del satélite MODIS que cubren el territorio nacional (Figura 5.1.), planteamos tres niveles espaciales de estudio: nivel nacional, nivel de la Red de Parques, nivel de ecosistema. Los datos relativos a los Parques y Ecosistemas procederán de la extracción de los píxeles correspondientes del mosaico nacional, a través de intersecciones espaciales realizadas con SIG y la integración de la información espectral y ambiental para la referenciación de los píxeles a un Parques o a un ecosistema. Por otro lado, la serie temporal de estudio abarcará desde el año 2000 a la actualidad.

2.3.2 Sistema de Seguimiento y Alerta

El seguimiento no debe limitarse a la “validación” acertada de lo ocurrido, sino que debe ser eficiente e informativo en la identificación y corrección de problemas actuales (Higgins et al., 2006). Por este motivo, junto a los módulos y productos de visualización que informan sobre el funcionamiento del ecosistema bajo una perspectiva histórica (documentando lo que ha ocurrido), el sistema también proporcionará alertas cuyo objetivo será proporcionar información sobre potenciales riesgos en los ecosistemas. Esto se hará a través de productos de visualización que informarán 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.), que serán 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.

2.4 Configuración general y niveles de desarrollo del sistema

En la siguiente figura (Figura 2.7.) se indica la configuración general y los niveles de desarrollo que se prevén: nivel nacional (Desarrollo I), nivel de Red (Desarrollo II) y nivel ecosistema (Desarrollo III). Como se puede observar el procesamiento de las imágenes es común a los tres niveles.

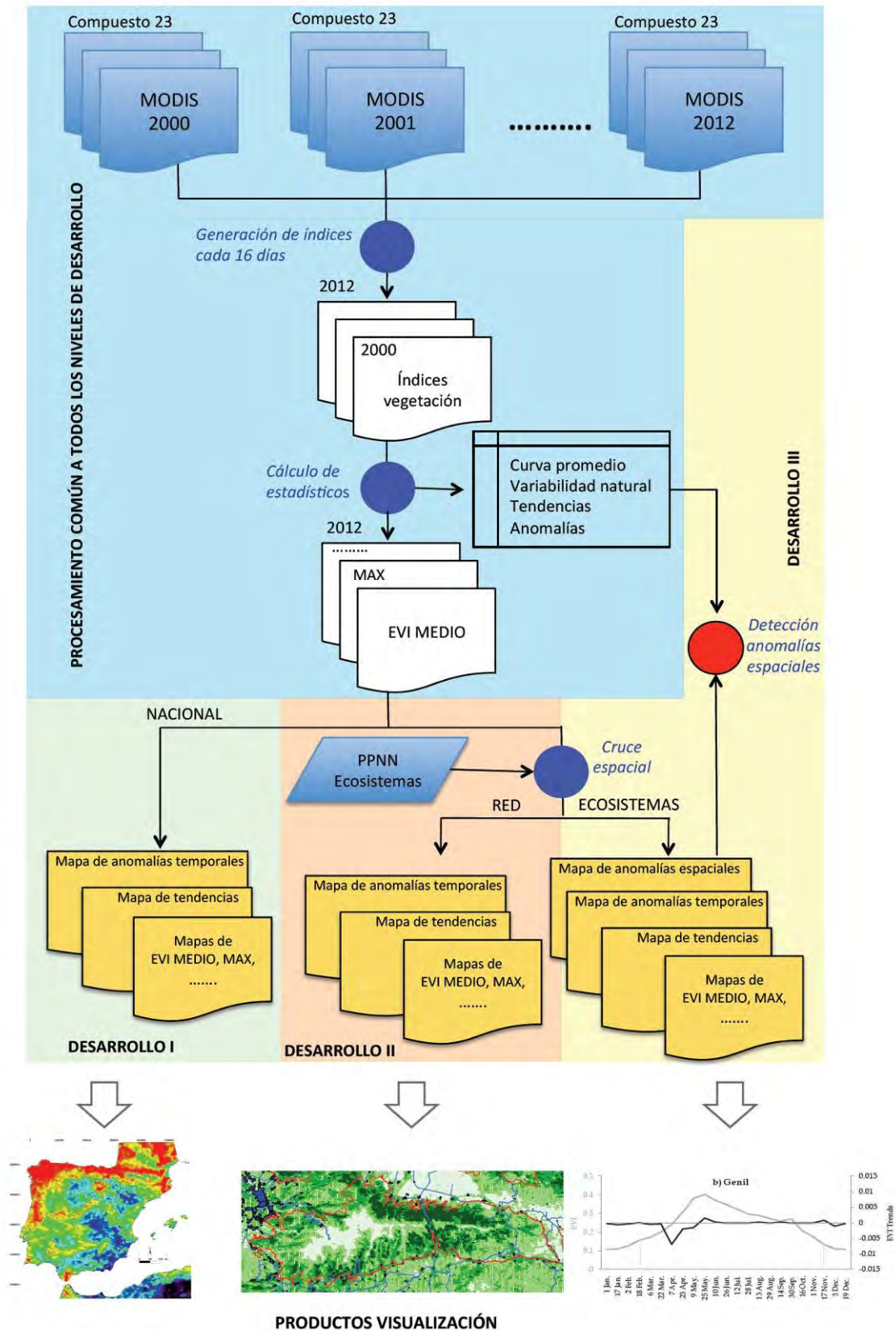


Figura 2.7. Configuración general y niveles de desarrollo del Sistema de Seguimiento y Alerta.

3 Preguntas de gestión y productos para la visualización y consulta

3.1 Trabajando con preguntas

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 éstas cuestiones y de los objetivos de seguimiento que se pretenden satisfacer. Como parte de la herramienta proponemos una serie de preguntas de gestión básicas, que inspiran los productos de visualización, y para cuyo desarrollo se requieren los trabajos de programación informática. Estas preguntas deberían ser incluidas en el visor web, de manera que el usuario siempre que visualizara los mapas o figuras pudiera establecer fácilmente la vinculación de éstas con la representación gráfica de que se trate. Puesto que planteamos 3 niveles de seguimiento, a continuación exponemos preguntas básicas para cada uno de ellos:

Nivel Nacional

- *¿Cómo varían en el espacio los ecosistemas españoles en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?*
- *¿Cómo están cambiando los ecosistemas españoles en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?*
- *¿Cómo se han comportado las diferentes regiones del país en términos del verdor de la vegetación en cada momento con respecto a su comportamiento histórico? ¿Cómo se han comportado en la última primavera? ¿Y en el último otoño o invierno?*

Nivel de Red

- *¿Cuáles son las condiciones de referencia de los Parques en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?*
- *¿Existe alguna tendencia de cambio direccional en los parques en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?*
- *¿Cómo se ha comportado el parque en el último año con respecto a la serie histórica? ¿Cómo se ha comportado el parque en la última primavera con respecto al resto de las primaveras? ¿Cómo se viene comportando el parque en el año en curso con respecto al mismo periodo en años anteriores?*

Nivel de ecosistema

- *¿Cuáles son las condiciones de referencia de los ecosistemas en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?*
- *¿Existe alguna tendencia de cambio direccional en los ecosistemas en términos de productividad primaria, fenología y estacionalidad?*
- *¿Cómo se ha comportado el ecosistema en el último año con respecto a la serie histórica? ¿Como se ha comportado el ecosistema en la última primavera con respecto al resto de las primaveras? ¿Como se viene comportando el ecosistema en el año en curso con respecto al mismo periodo en años anteriores?*
- *¿Qué áreas/localidades por las que se distribuye un ecosistema muestran un comportamiento anómalo o extremo?*

A continuación se exponen los productos de visualización que se prevén de acuerdo con las preguntas de gestión a las que corresponden (Tablas 3.1. a 3.3., Figuras 3.1. a 3.15.).

ESCALA DE ANÁLISIS: TERRITORIO NACIONAL						
Preguntas de gestión		Tipo de análisis	Aspecto funcional evaluado	Atributos de EVI empleados	Productos y elementos de visualización	
¿Cómo varían regionalmente los principales descriptores funcionales (columna “aspecto funcional”) de los ecosistemas en España?		Estimación de valores medios de los atributos	Dinámica estacional de las ganancias de C	Curva del año medio = 23 imágenes con la media inter-anual del EVI en cada momento del año	Mapas nacionales (Mapas tipo 1)	
			Productividad primaria anual	EVI medio anual, Máximo (MAX) y Mínimo (MIN) anuales		
			Fenología	Fecha del máximo (DMAX), y del mínimo (DMIN)		
			Estacionalidad	CV intra-anual		
¿Cómo están cambiando los ecosistemas españoles?	¿Cómo están cambiando los ecosistemas españoles?	Estimación de las tendencias y su nivel de significación	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas nacionales de tendencias para los atributos (Mapa tipo 2a) y con opción para regular el p-value (Mapa tipo 2b). Ídem para el EVI en cada mes (en realidad, serían 23 compuestos por año) (Mapa tipo 2c).	
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN		
			Fenología	DMAX, DMIN		
			Estacionalidad	CV intra-anual		
	¿Cómo están cambiando los ecosistemas españoles?	¿Cómo se ha comportado el EVI de los últimos 16 días respecto a la serie histórica en las distintas regiones del país? ¿Y el EVI del último año? ¿Y el EVI del año en curso? ¿Cómo se han comportado en la última estación las diferentes regiones de España con respecto a esa misma estación en el pasado?	Estimación de las anomalías temporales y eventos extremos	Dinámica estacional	último compuesto de EVI disponible	Mapas nacionales de anomalías temporales del EVI de los últimos 16 días (u otro periodo personalizado) respecto a la serie histórica (Mapas tipo 3). Mapas nacionales de anomalías temporales de los atributos funcionales del EVI del último año respecto a la serie histórica (Mapas tipo 3). Ambos tendrán la opción de personalización de la ventana temporal de análisis (inicio y final del periodo de interés) que se quiere comparar con el registro histórico
				Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
				Fenología	DMAX, DMIN	
				Estacionalidad	CV intra-anual	

Tabla 3.1. Preguntas de gestión y productos de visualización para el nivel de desarrollo I (Nacional)

ESCALA DE ANÁLISIS: RED DE PARQUES NACIONALES					
Preguntas de gestión		Tipo de análisis	Aspecto funcional evaluado	Atributos de EVI empleados	Productos y elementos de visualización
¿Cuáles son las condiciones de referencia de los parques españoles en términos de -aspecto funcional?		Estimación de valores medios (y su variabilidad histórica) de los atributos	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas de atributos para cada parque (Mapa tipo 4). Curvas del año medio de cada parque (Gráfico tipo 1). Gráficos de barras tipo 2 para cada parque.
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	
			Estacionalidad	CV intra-anual	
¿Cómo están cambiando los parques españoles?	¿Existe alguna tendencia de cambio direccional en los parques en términos de -aspecto funcional-?	Estimación de las tendencias de los atributos y su nivel de significación	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas de tendencias de atributos para cada parque con opción para regular el p-value (Mapa tipo 5). Tendencias de los atributos (Gráfico tipo 3) Tendencias del EVI por estaciones. (Gráfico tipo 4).
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	
			Estacionalidad	CV intra-anual	
	¿Cómo se ha comportado el parque los últimos 16 días respecto a la serie histórica? ¿Cómo se ha comportado el parque en el último año con respecto a la serie histórica? ¿Cómo se ha comportado el parque en la última primavera con respecto al resto de las primaveras? ¿Cómo se viene comportando el parque en el año en curso con respecto al mismo periodo de años anteriores?	Estimación de las anomalías temporales y eventos extremos	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas de anomalías temporales de cada compuesto y atributo por parque. Se podrá personalizar el inicio y fin del periodo de análisis a comparar con el histórico. Mapa tipo 3 pero centrado y optimizado para cada parque nacional. Curvas anuales donde se compara el último valor registrado con el promedio y la variabilidad histórica. Gráfico tipo 5. Gráfico de cajas de los atributos donde se compara el último año/periodo frente al registro histórico en un eje Y, y en el otro el porcentaje de píxeles con anomalías significativas (positivas y negativas). Gráfico tipo 6.
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	
			Estacionalidad	CV intra-anual	

Tabla 3.2. Preguntas de gestión y productos de visualización para el nivel de desarrollo II (Red de PPNN).

ESCALA DE ANÁLISIS: ECOSISTEMAS (dentro de cada parque)					
Preguntas de gestión		Tipo de análisis	Aspecto funcional evaluado	Atributos de EVI empleados	Productos y elementos de visualización
¿Cuáles son las condiciones de referencia de los ecosistemas en términos de –aspecto funcional-?		Estimación de valores medios de los compuestos y atributos	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas y gráficos, opción a regular el % de pureza del píxel. Mapas de atributos para cada ecosistema (Mapas tipo 6). Curvas del año medio de cada ecosistema. Gráfico tipo 1 pero para cada ecosistema. Gráficos tipo 2 para cada ecosistema.
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	
			Estacionalidad	CV intra-anual	
¿Cómo están cambiando los ecosistemas protegidos en la Red de PPNN de España?	¿Existe alguna tendencia de cambio direccional en los ecosistemas en términos de –aspecto funcional-?	Estimación de las tendencias de los atributos y su nivel de significación	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas y gráficos con opción a regular el pvalue y el % de pureza del píxel. Mapas tipo 7 de tendencias de los atributos en cada ecosistema. Tendencias de los atributos para cada ecosistema (Gráfico tipo 3). Tendencias del EVI por estaciones para cada ecosistema (Gráfico tipo 4).
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	
			Estacionalidad	CV intra-anual	
¿Cómo se ha comportado el ecosistema en el último año con respecto a la serie histórica? ¿Cómo se ha comportado el ecosistema en la última primavera con respecto al resto de las primaveras? ¿Cómo se viene comportando el ecosistema en el año en curso con respecto al mismo periodo en años anteriores?	Estimación de las anomalías temporales y eventos extremos	Estimación de las anomalías temporales y eventos extremos	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapas de anomalías temporales de cada compuesto y atributo por parque con opción a personalizar el inicio y fin del periodo de análisis a comparar con el histórico. Mapa tipo 3 centrado y optimizado para cada parque. Curvas anuales que comparan el último valor registrado con el promedio y la variabilidad histórica. Gráfico tipo 5. Gráfico de cajas de los atributos que comparan el último año/periodo frente al registro histórico en un eje Y, y en el otro el % de píxeles con anomalías significativas (positivas y negativas) (Gráfico tipo 6).
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	
			Estacionalidad	CV intra-anual	
¿Qué áreas/localidades por las que se distribuye un determinado ecosistema muestran un comportamiento anómalo o extremo?		Estimación de las anomalías espaciales	Dinámica estacional	23 compuestos de EVI	Mapa tipo 8 donde se diferencian los píxeles de un ecosistema que están muy por encima o muy por debajo de la media para ese ecosistema.
			Productividad primaria anual	EVI medio, MAX, MIN	
			Fenología	DMAX, DMIN	

ESCALA DE ANÁLISIS: ECOSISTEMAS (dentro de cada parque)				
Preguntas de gestión	Tipo de análisis	Aspecto funcional evaluado	Atributos de EVI empleados	Productos y elementos de visualización
		Estacionalidad	CV intra-anual	

Tabla 3.3. Preguntas de gestión y productos de visualización para el nivel de desarrollo III (Ecosistemas)

3.2 Productos de visualización

Se exponen a continuación los productos de visualización que se han previsto. Estos productos son de dos tipos:

- 1) **Mapas**, se proponen como herramienta para ilustrar patrones espaciales de comportamiento de los indicadores de seguimiento, dependiendo de la escala de análisis, estos mapas podrán representar el territorio nacional, la red de parques nacionales, o ecosistemas concretos dentro de cada parque.
- 2) Gráficos de líneas (o curvas) y de cajas o barras:
 - a. Los **gráficos de líneas** sirven para ilustrar la dinámica estacional (a lo largo del año) que describen los valores de los índices espectrales que se registran en cada fecha de incorporación de una imagen de satélite. La descripción de esta dinámica es aplicable a las diferentes entidades que se pretendan reconocer, en nuestro caso dichas entidades (conjunto de píxeles) son los parques nacionales y los ecosistemas.
 - b. Los **gráficos de cajas y/o barras** se proponen para establecer comparaciones entre parques o ecosistemas, con respecto al comportamiento que muestran para los diferentes indicadores.

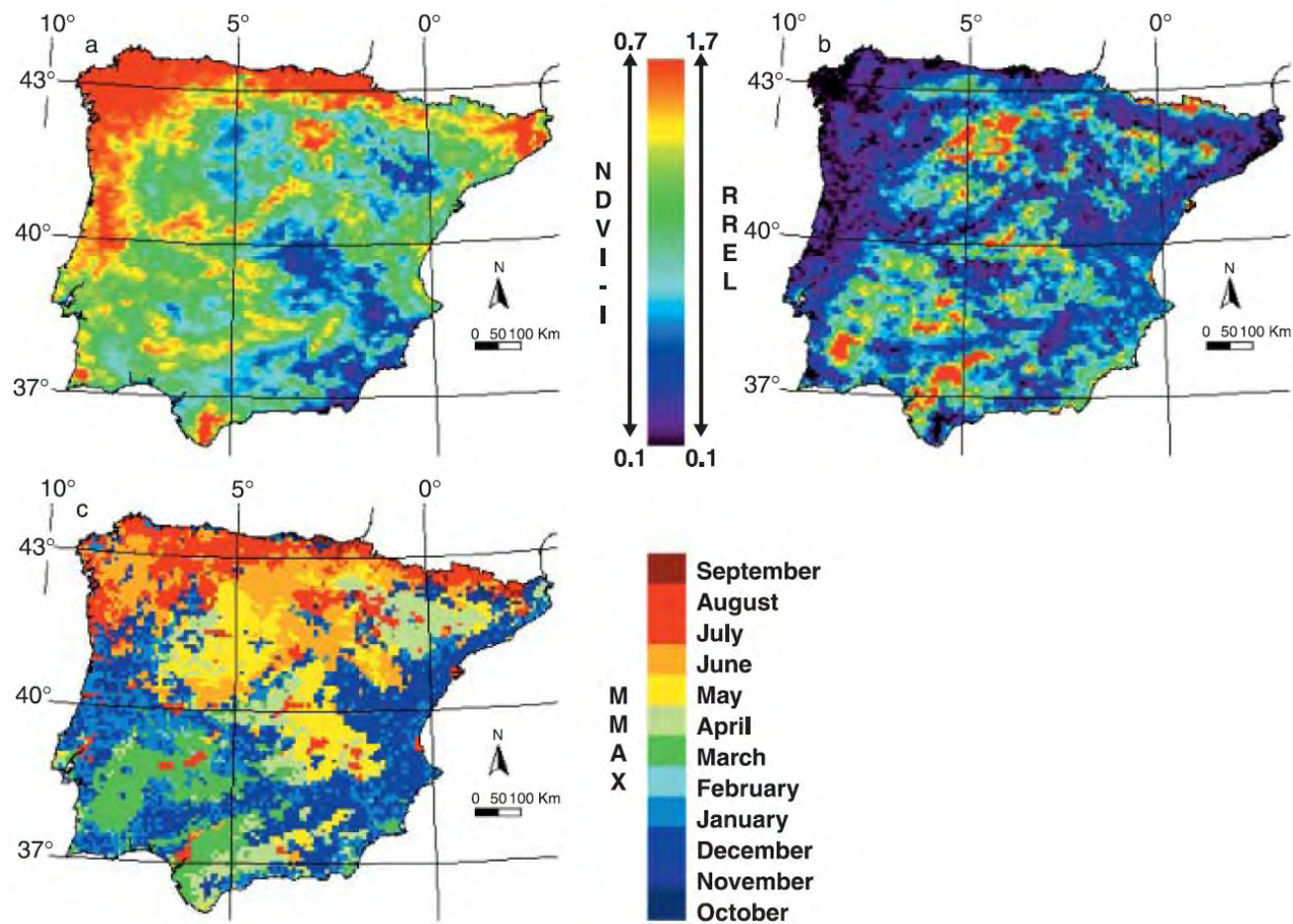


Figura 3.1. Mapas tipo 1. Caracterización funcional de los ecosistemas de España: mapas de . Se podrían ofrecer 23 mapas del EVI de cada compuesto del año (no se muestra ejemplo) y los atributos funcionales de EVI_medio_anual, MAX, MIN, DMAX, DMIN, CV_intra-anual.

Ejemplo: (a) NDVI Annual integral (NDVI-I, productivity), (b) annual relative range of N (MMAX, phenology. Tomado de Alcaraz-Segura et al. (2006). *Global Ecology and Biogeog*

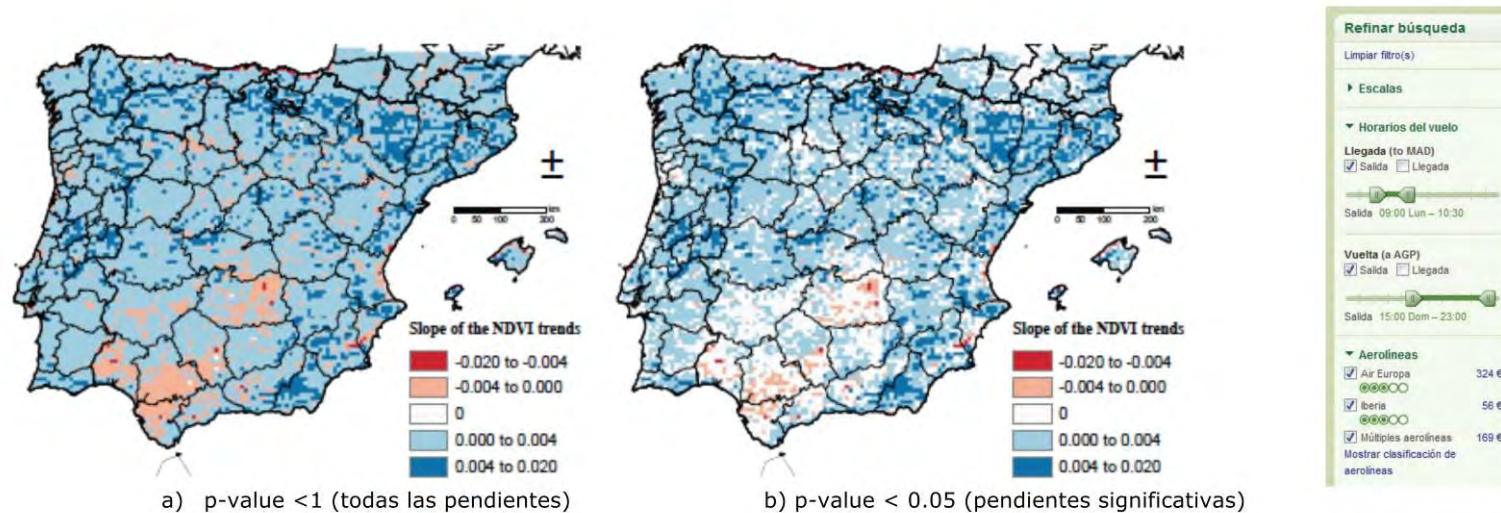


Figura 3.2. Mapa tipo 2a y 2b. Mapas de tendencias (con la posibilidad de mostrar sólo las significativas) en los distintos atributos funcionales. Tomado de Alcaraz-Segura et al. (2010). *Sensors*.

La diferencia entre el mapa tipo 2a y tipo 2b viene determinado por el p-valor empleado para filtrar los resultados estadísticamente significativos (p-value; *Mann-Kendall trend test*). Ambos mapas se mostrarían en el mismo panel pero para personalizar la selección del umbral de p-value a mostrar, pueden usarse barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos como en el ejemplo de www.tripadvisor.es.

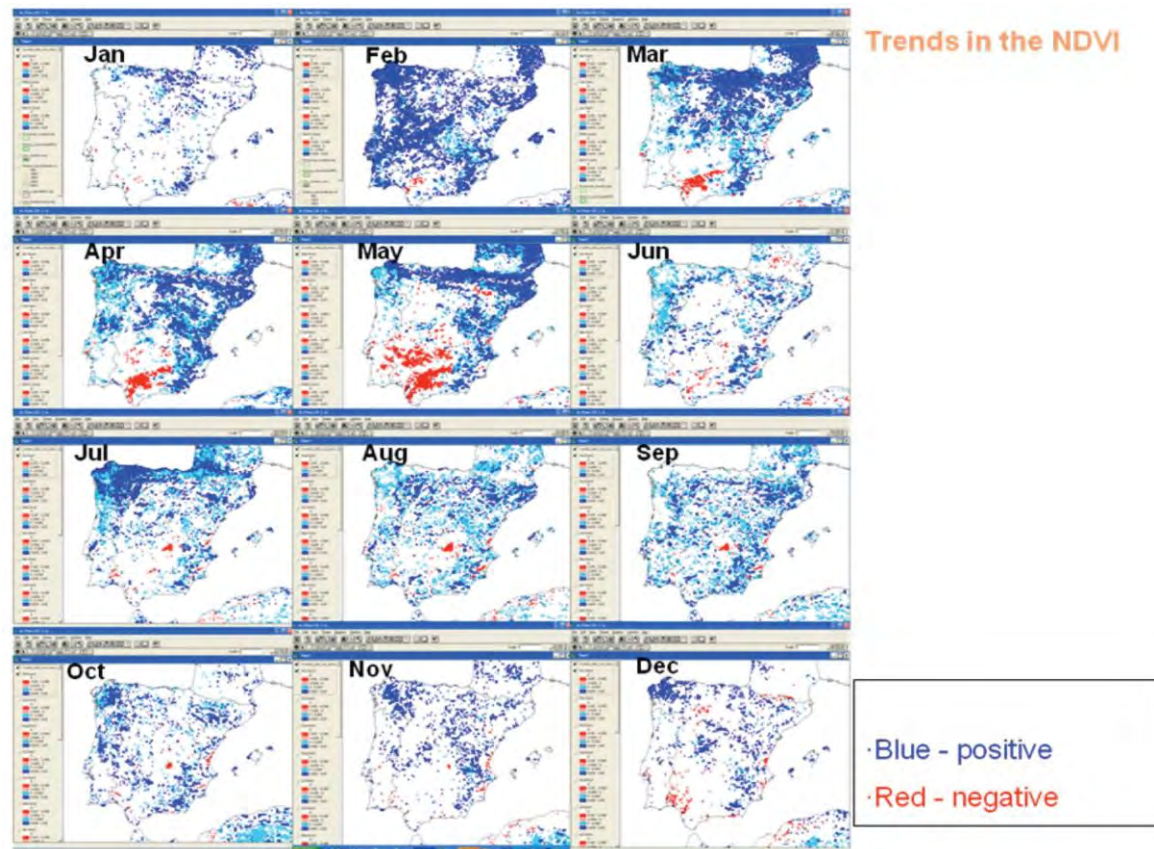


Figura 3.3. Mapas tipo 2c. Tendencias por meses (en realidad, serían 23 compuestos por año y no 12 meses). La idea es que todos puedan visualizarse en la misma página para permitir ver patrones estacionales en las tendencias.

En el ejemplo, las tendencias negativas en el SW se observan principalmente en primavera. El SE, en cambio, muestra tendencias positivas en todos los meses del año. Tomado de Alcaraz-Segura (2005).

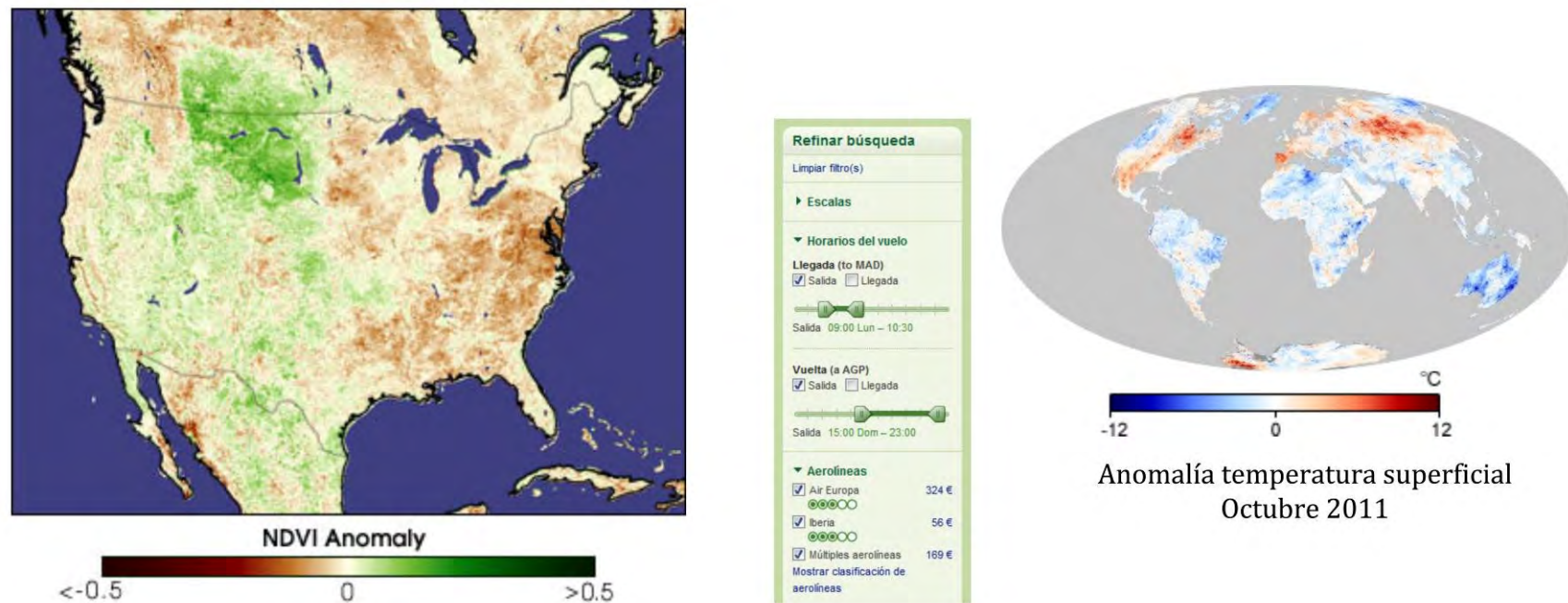


Figura 3.4. Mapas tipo 3. Anomalías temporales: i.e. la diferencia entre el EVI de un momento de un año determinado (por ejemplo, agosto de 2011) y el EVI promedio del mismo momento del año en toda la serie histórica. La anomalía puede o no ser significativamente distinta (estar muy alejada) de la media histórica.

Para permitir al usuario saber si es una anomalía extrema, i.e., está alejada significativamente de la media histórica, el mapa se acompañará un selector interactivo de p-valor para mostrar todas las anomalías (e.g. $p\text{-value} \leq 1$) o sólo aquellas que están significativamente alejadas de la media (e.g., $p\text{-value} \leq 0.001$). Para refinar la selección de p-value pueden usarse barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos como en el ejemplo de www.tripadvisor.es que se acompaña al mapa. Se deberían ofertar los p-values a partir de métodos paramétricos y no-paramétricos para obtener los intervalos de confianza. Esta barra también debería ofrecer la posibilidad de seleccionar interactivamente el comienzo y fin del periodo que se quiere comparar.

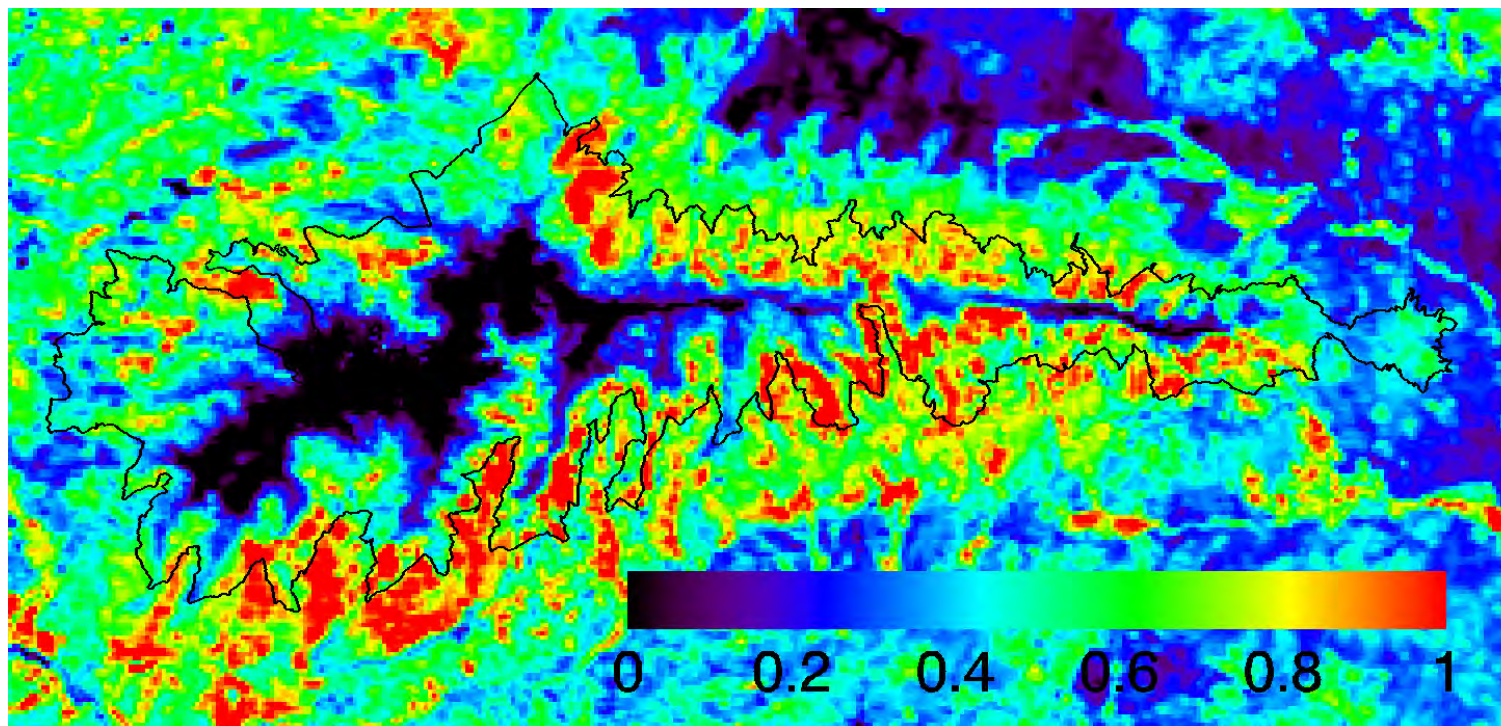


Figura 3.5. Mapa tipo 4. Mapas equivalentes a los tipo 1 pero centrados y optimizados para la visualización de cada parque nacional. Mapa del EVI_medio_anual para Sierra Nevada.

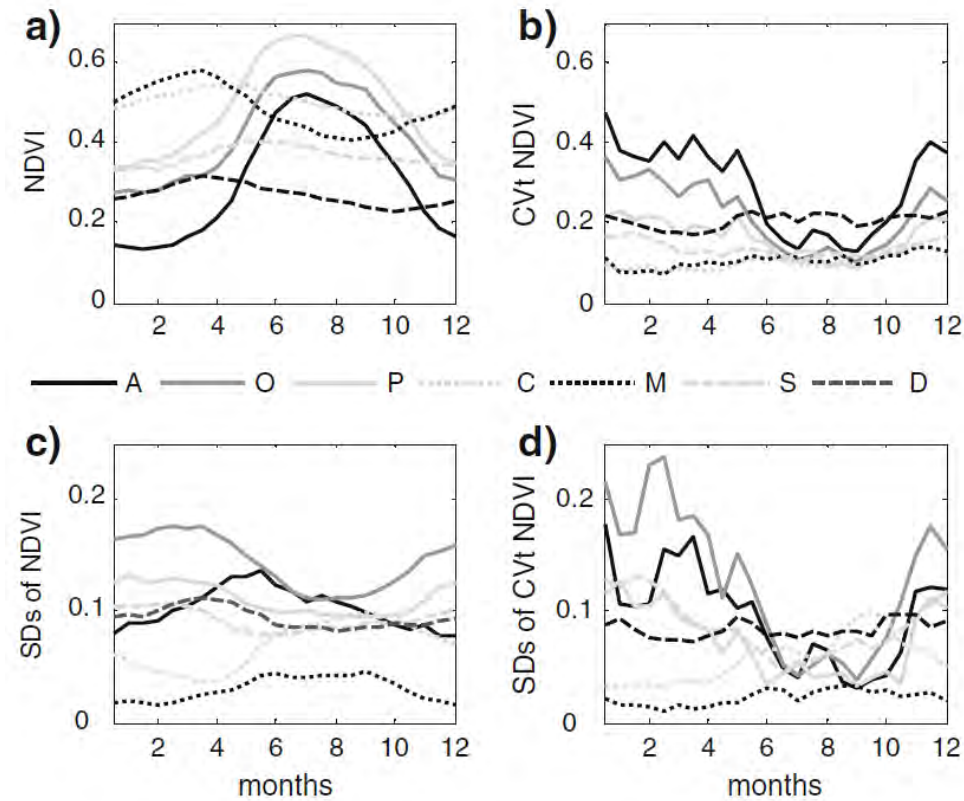


Figura 3.6. Gráfico tipo 1. Condiciones de referencia y su rango de variabilidad de la dinámica estacional del EVI para cada parque nacional.

Ejemplo: (a) Mean seasonal dynamics of the NDVI for the 1982–2006 period for each national park. (b) Interannual variability of the NDVI annual curve for each park calculated as the interannual coefficient of variation (CVt) of the mean seasonal dynamics. (c), (d) The spatial standard deviation of each park for the NDVI mean seasonal dynamics (in a) and the interannual variability (in b), respectively. 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 et al. (2009). *Environmental Management*.

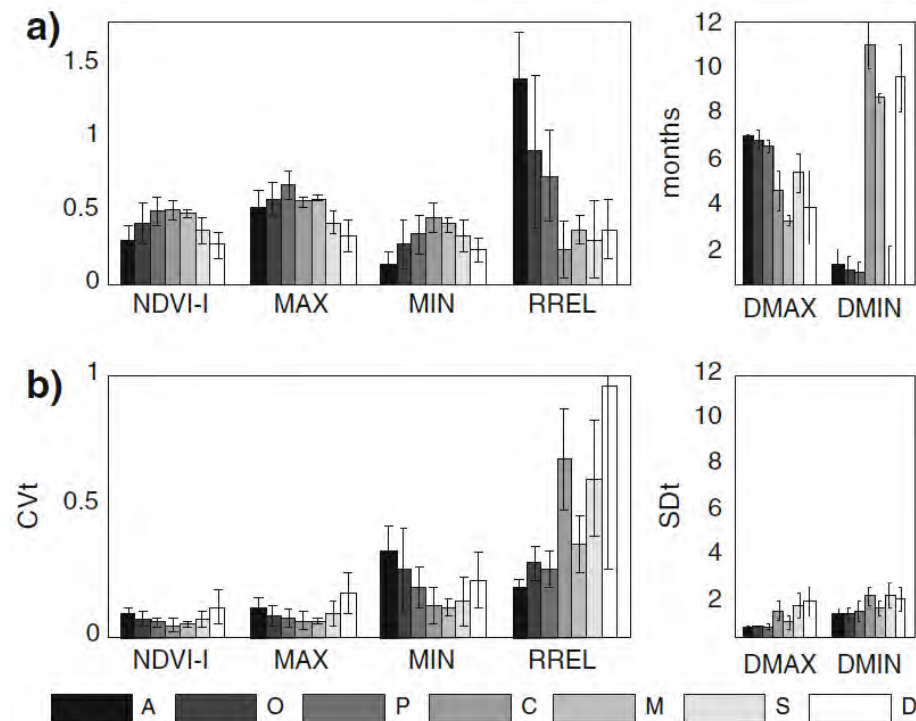


Figura 3.7. Gráfico tipo 2. Condiciones de referencia de los atributos funcionales derivados de la dinámica estacional del EVI para cada parque nacional.

Ejemplo: *Functional characterization of the national parks based on six attributes derived from the NDVI seasonal dynamics for the 1982–2006 period.*

(a) *Mean values for each attribute and park; (b) interannual variability of the six NDVI attributes for each park calculated as the interannual coefficient of variation (CVt) for NDVI-I (NDVI annual mean), RREL (relative range), MAX and MIN (maximum and minimum NDVI), and the interannual standard deviation (SDt) for DMAX and DMIN (dates of the MAX and MIN). A: Aigüestortes i E. S. Maurici; O: Ordesa y Monte Perdido; P: Picos de Europa; C: Cabañeros; M: Monfragüe; S: Sierra Nevada; D: Doñana. Error bars indicate spatial standard deviation. Tomado de Alcaraz-Segura et al.(2009). Environmental Management.*

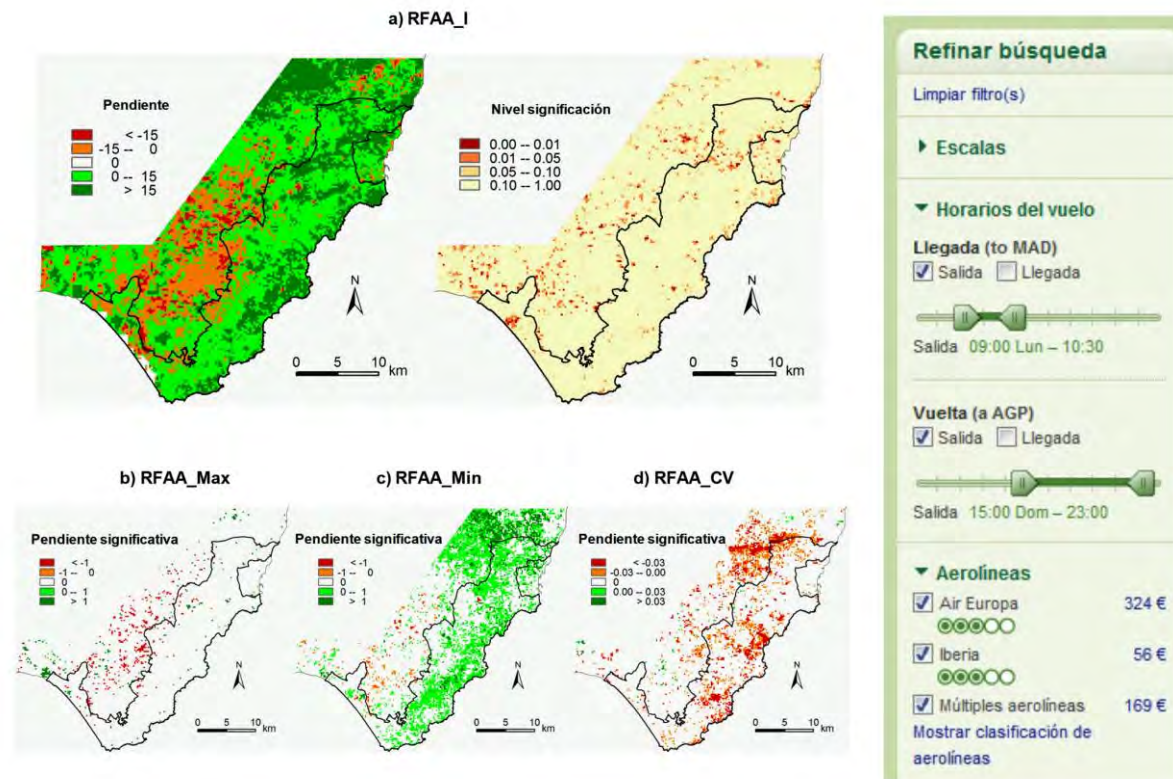


Figura 3.8. Mapa tipo 5. Equivalentes a los mapas tipo 2 pero centrados y optimizados para la visualización de cada parque nacional. Para personalizar la selección de p-value pueden usarse barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos descritas en el mapa tipo 2.

Ejemplo: Mapas de tendencias en la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) por la vegetación en el área protegida Reserva de la Biosfera del Cabo de Gata-Níjar (Almería-España) y zonas limítrofes en el periodo 2001-2008. Los mapas muestran: (a) la pendiente de la tendencia en la integral anual (RFAA_I) (izquierda), y su nivel de significación o p-valor (derecha); y las tendencias significativas; en (b) los valores máximos (RFAA_Max), (c) los valores mínimos (RFAA_Min), y d) en el coeficiente de variación (RFAA)_CV). Las pendientes fueron calculadas con el método de Sen. La significación de las mismas fue calculada con el test de tendencias de Mann-Kendall. Tomado Oyonarte et al. (2010). UNESCO y Alcaraz-Segura et al. 2011

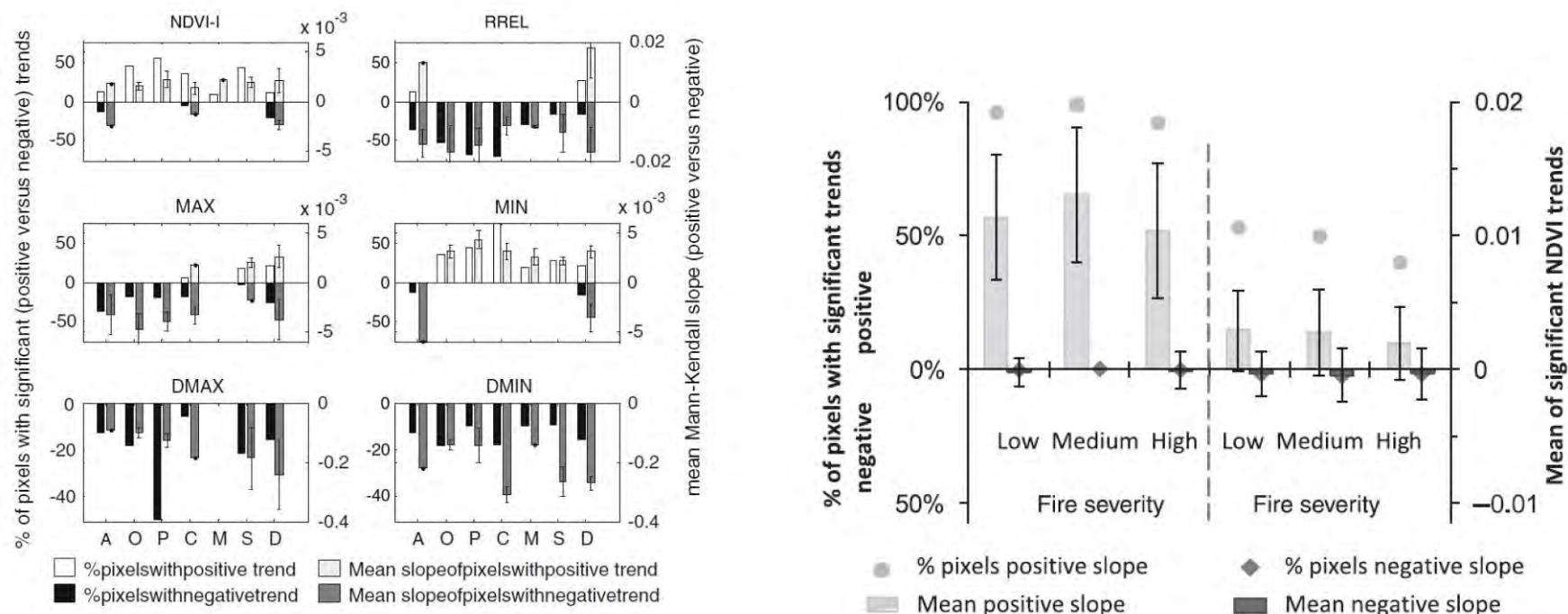


Figura 3.9. Gráfico tipo 3. Tendencias de los atributos funcionales. Se persigue un gráfico equivalente al de la izda pero que muestre el píxeles con tendencia significativa dentro del parque con un punto como en el gráfico de la derecha (Alcaraz-Segura et al. 2010 *Global Change Biology*). Personalización del p-value mediante barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos descritas en el mapa tipo 2.

Ejemplo: Gráfico de la izquierda: *Temporal trends in the Spanish national parks between 1982 and 2006 for six descriptors of ecosystem functioning derived from the NDVI dynamics: NDVI-I, MAX, and MIN represent the annual mean, maximum, and minimum NDVI values, respectively (estimators of radiation interception), RREL is the NDVI annual relative range (indicator of seasonality), and DMAX and DMIN correspond to the dates of the MAX and MIN values, respectively (descriptors of land-surface phenology). Bars represent the percentage (left Y-axis) and mean slope (right Y-axis) of the pixels that showed significant ($P < 0.05$) positive (upper bars) and negative (lower bars) trends for each park. Trends were obtained using the Mann–Kendall trend test. 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 et al. 2009. *Environmental Management*.*

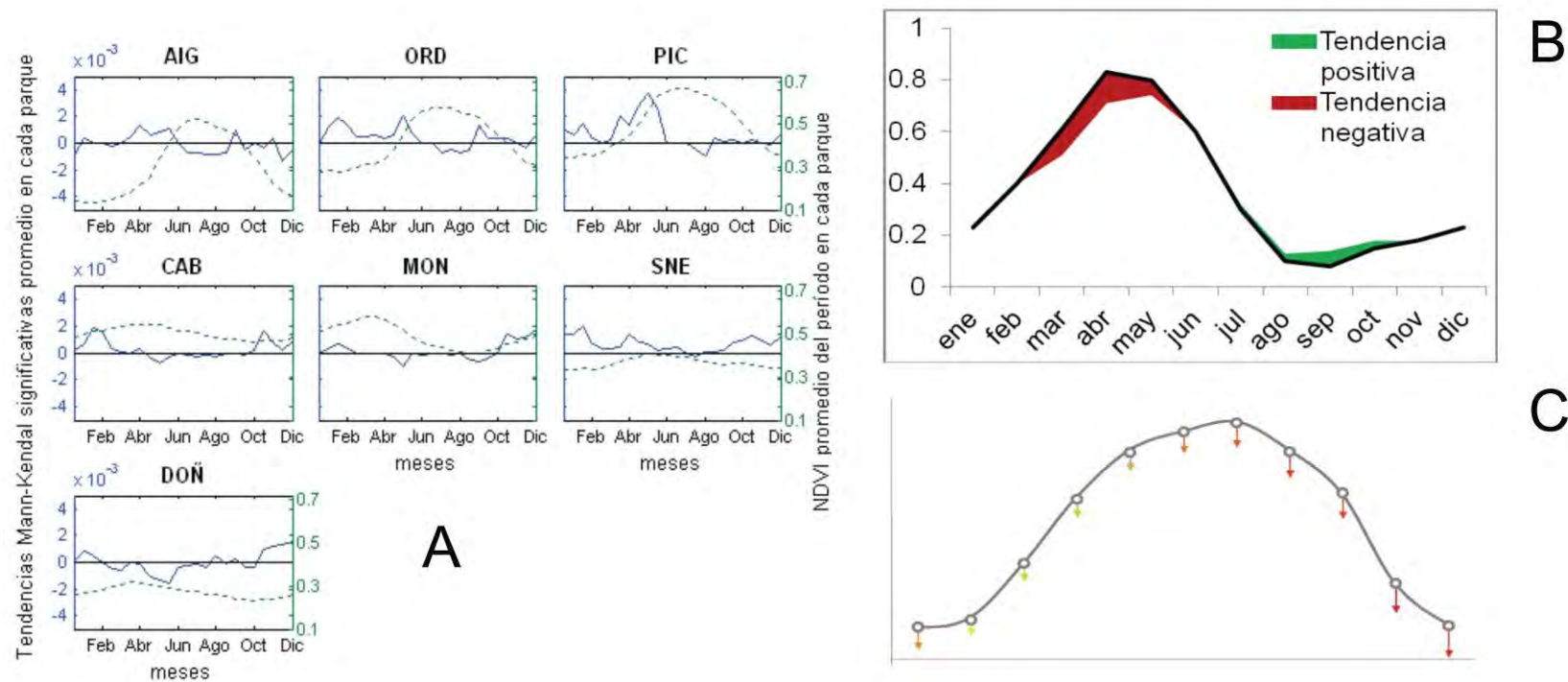
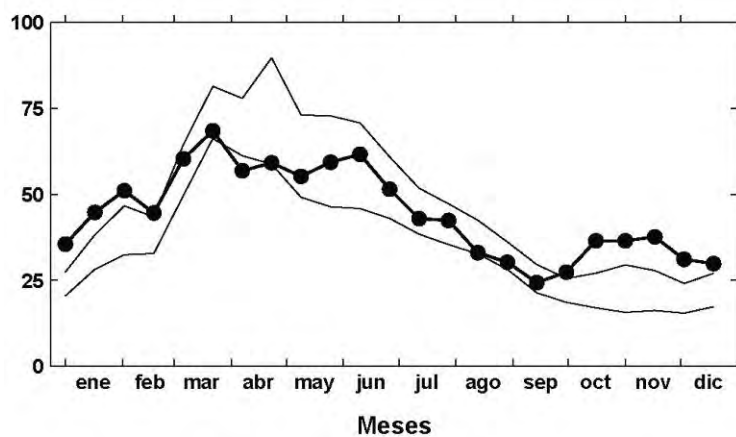


Figura 3.10. Gráfico tipo 4. Tendencias del EVI a lo largo del año para diferentes parques nacionales. Tres alternativas para facilitar la visualización e interpretación de los resultados (A, B, C). En todos los casos se podría personalizar el p-value para seleccionar el nivel de significación de las tendencias, mediante barras con límites superior e inferior como las descritas en el mapa tipo 2.

Ejemplo A: Comparación entre 7 PPNN ibéricos de las tendencias (1982-2006) de la dinámica estacional del NDVI. En eje izquierdo (azul continuo) el promedio del parque para las pendientes significativas -test de Mann-Kendall (valor $P < 0.05$) - (Alcaraz-Segura et al. 2008. Ecosistemas). Ejemplo B: A la derecha (verde discontinuo) se representa la curva estacional promedio del NDVI en ese periodo. En el eje X, los 12 meses del año. Eurosiberianos: AIG: Aigüestortes; ORD: Ordesa; PIC: Picos de Europa. Mediterráneos: CAB: Cabañeros; MON: Monfragüe; SNE: S. Nevada; DOÑ: Doñana. Ejemplo C: Tendencias en el número de días de nieve (Bonet & Cayuela 2009). En las alternativas B y C se podría emplear un solo eje Y para representar tanto el EVI como la tendencia del EVI, multiplicando el valor de la pendiente de la tendencia por el número de años del periodo evaluado. Así, la tendencia del EVI ya no sería en “cambio en unidades de EVI por año” sino en “cambio en unidades de EVI durante el periodo evaluado”. También se podría incluir una leyenda aparte con la equivalencia entre el valor de la pendiente y el alto del polígono o la longitud de la flecha.



A)



B)

Figura 3.11. Gráfico tipo 5. Gráfico para el sistema de alerta temprana, dos ejemplos.

- A) El último valor de EVI registrado para el parque se compara con la curva anual del promedio histórico y un intervalo de confianza para determinar si se trata de un evento extremo significativamente distinto al resto de la serie histórica. Puede personalizarse el intervalo de confianza mediante barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos descritas en el mapa tipo 2. Las líneas continuas indican el rango promedio más/menos una desviación estándar (en este caso 2001-2007), y la línea gruesa con puntos muestra la dinámica del año más reciente. Un dato cada 16 días. Tomado de Oyonarte et al. (2010). UNESCO y Alcaraz-Segura et al. (2011).
- B) Ejemplo ha sido tomado de la web del *Joint Research Centre* sobre “*Assessing Protected Areas in Africa*” <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/APAAT>.

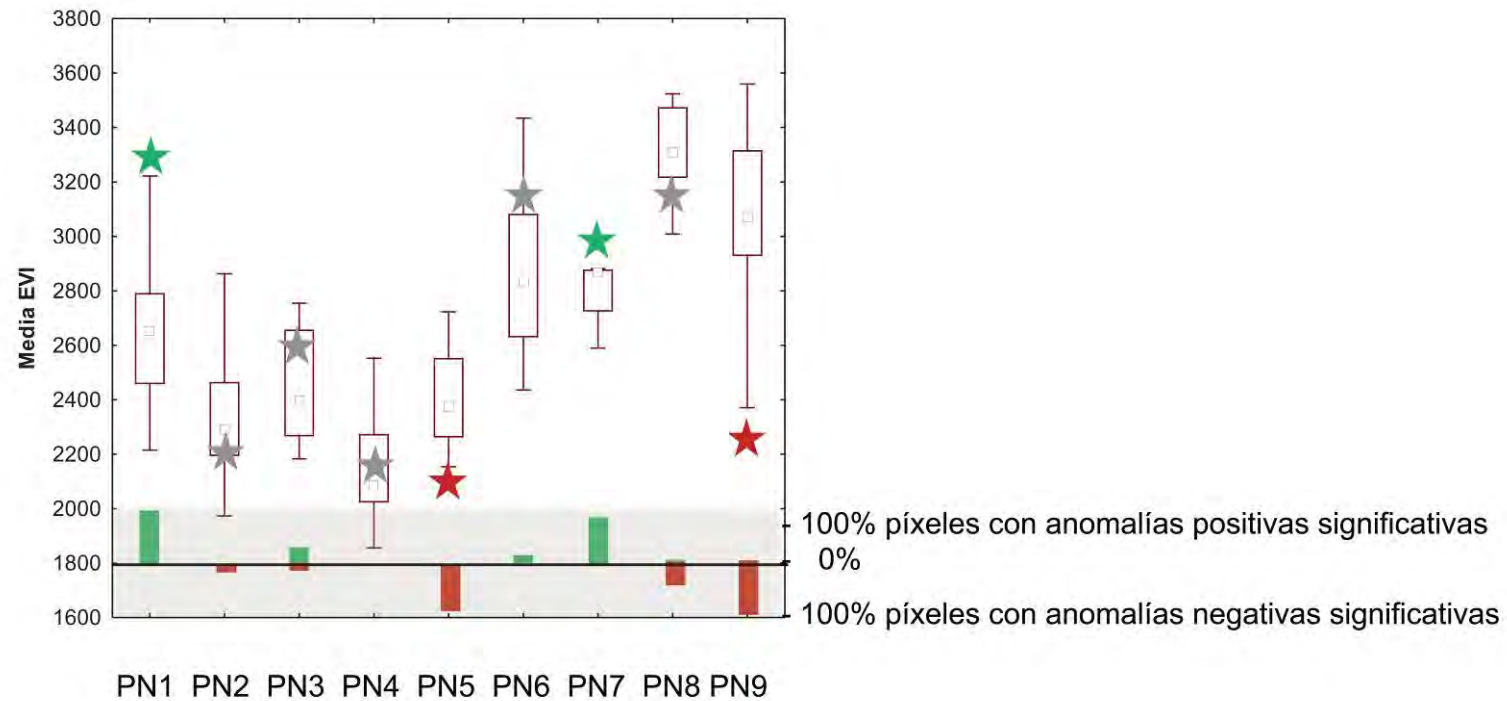


Figura 3.12. Gráfico tipo 6. Gráfico de anomalías temporales de los atributos. Se compara el último año/periodo frente al registro histórico para el conjunto de todo el parque (parte superior), y la superficie afectada por tales anomalías (% píxeles afectados, parte inferior).

En el ejemplo se muestra la media anual de EVI en el registro histórico para 9 parques nacionales. Las estrellas muestran el valor de EVI_medio_anual del último año completo. Dichas estrellas se muestran en verde cuando el último año fue significativamente mayor al promedio histórico, en rojo cuando fue significativamente menor, y en gris cuando no se mostró diferente al histórico. En la parte inferior se indica con barras hacia arriba si las anomalías fueron positivas, y hacia abajo si fueron negativas. Puede personalizarse el p-value mediante barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos descritas en el mapa tipo 2.

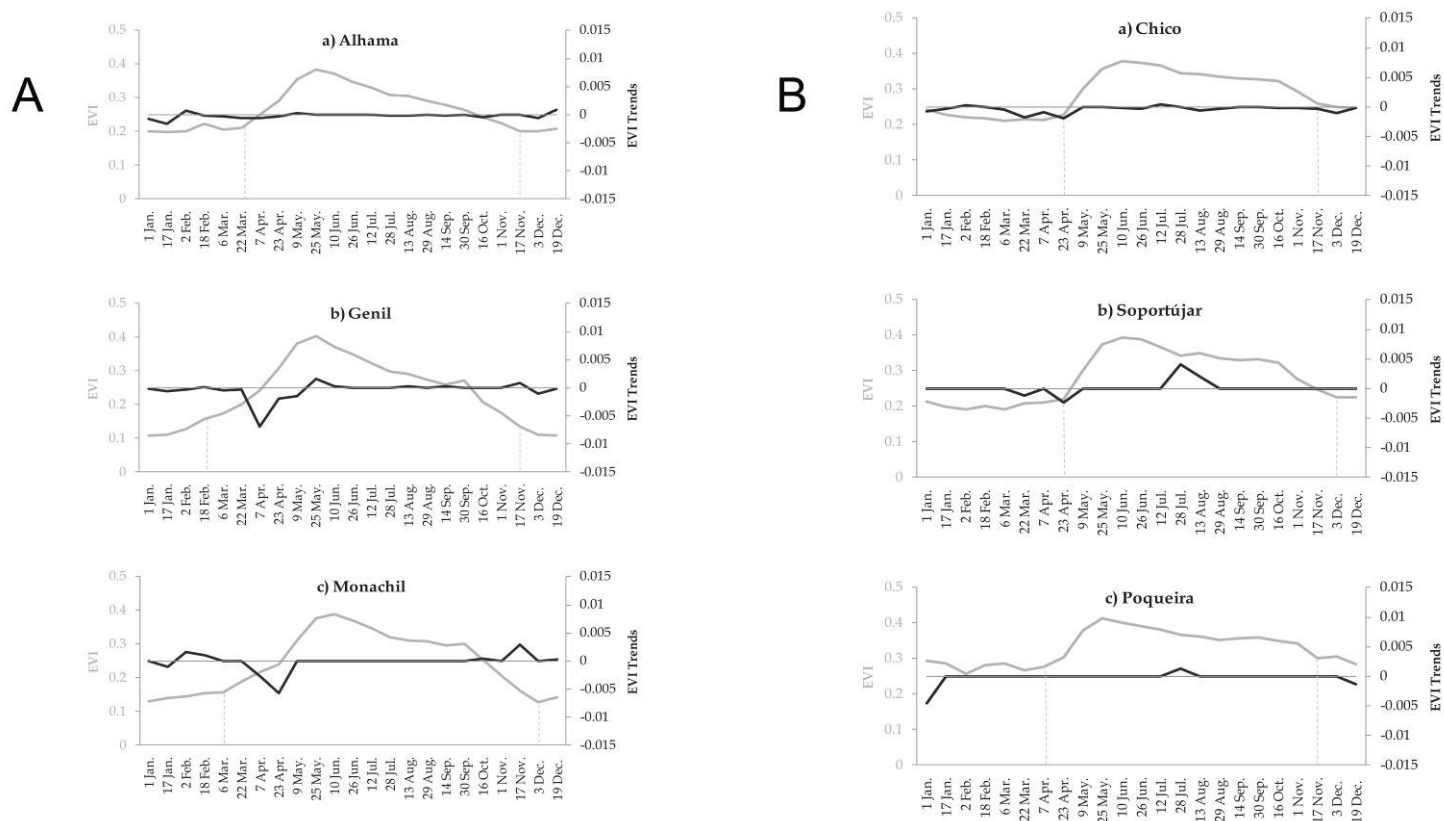


Figura 3.13. Gráfico tipo 7. Tendencias del EVI a lo largo del año para los parches de un ecosistema concreto en un parque. Personalización del p-value mediante barras con límites superior e inferior como las descritas en el mapa tipo 2.

Ejemplo: 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 (A) y en la cara sur (B) 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.

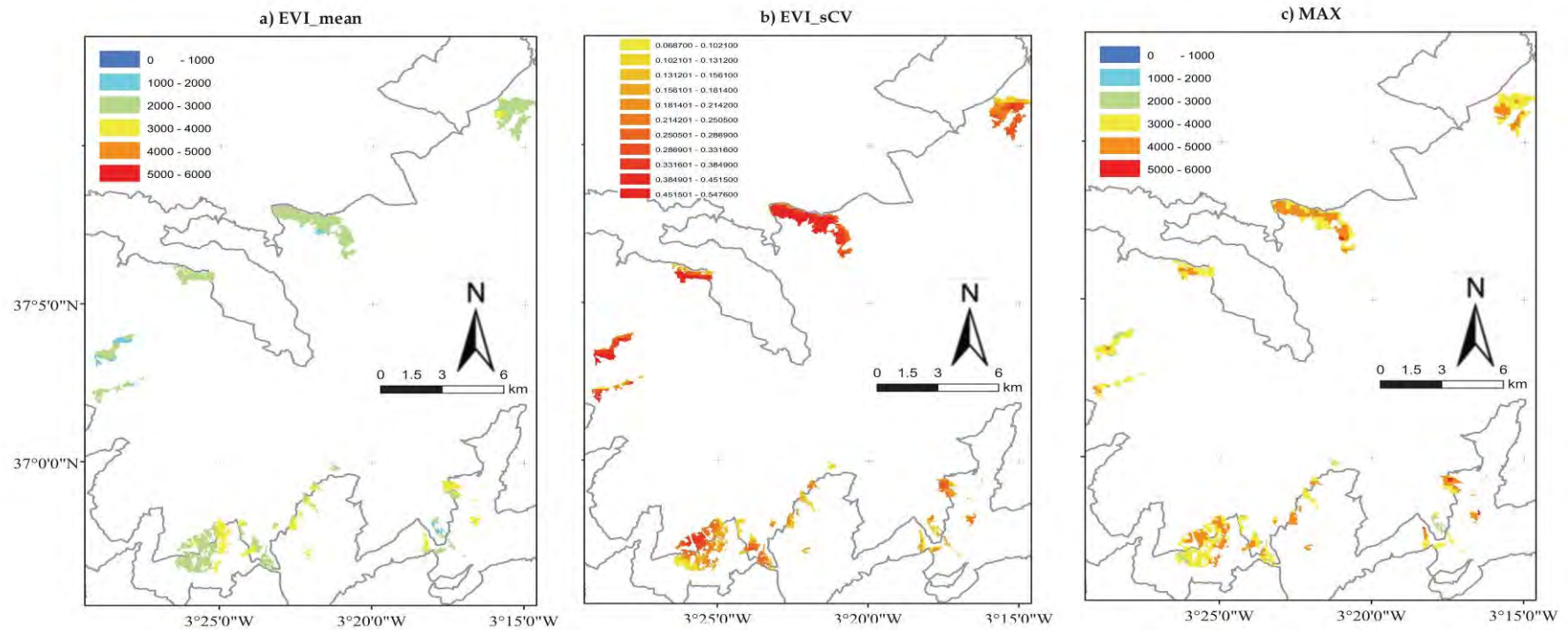


Figura 3.14. Mapas tipo 6. Equivalentes a los mapas tipo 1 pero centrados en un determinado ecosistema dentro de un parque nacional.

Ejemplo: Mapas de los atributos de EVI (EVI_mean, EVI_sCV, MAX) de los robledales de Sierra Nevada generados por aplicación Monparq. Tomado de Dionisio et al. (2012), *In Tech*.

Los gráficos deberían incluir la posibilidad de ajustar mediante una barra (similar a la descrita en el mapa tipo 2) el porcentaje de pureza del píxel (superior e inferior) para representar a un determinado ecosistema. En el ejemplo se muestran los píxeles con un 70% o más de robledales de roble melojo de Sierra Nevada.

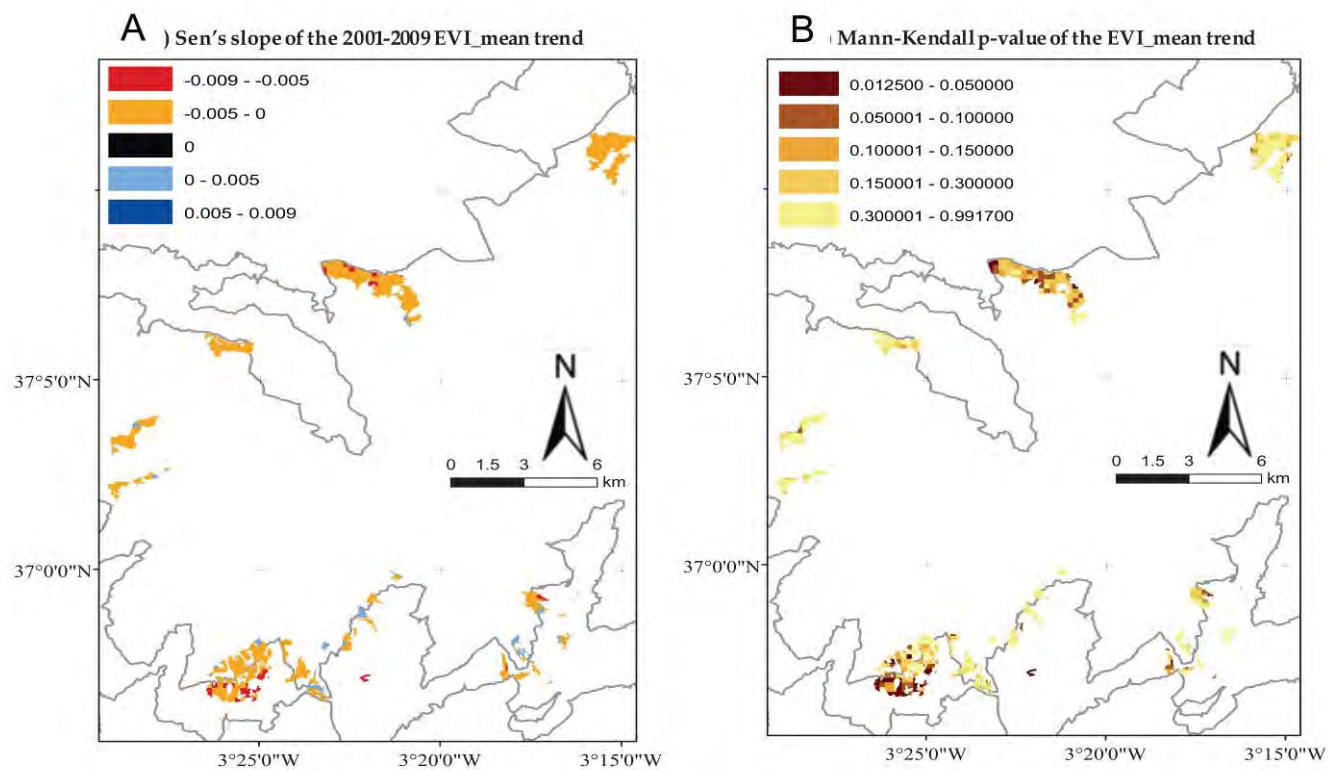


Figura 3.15. Mapa tipo 7. Mapa de tendencias de los atributos para cada ecosistema. Se muestran dos características de las tendencias: **A) La pendiente de Sen que da una idea de la magnitud de la tendencia, y B) el p-valor de la tendencia, que indica su significación estadística. Se podría añadir la posibilidad de regular el p-value y el % de pureza del píxel.**

Ejemplo: Mapas de las tendencias de EVI en los robledales de Sierra Nevada. Tomado de Dionisio et al. (2012) *In Tech*.

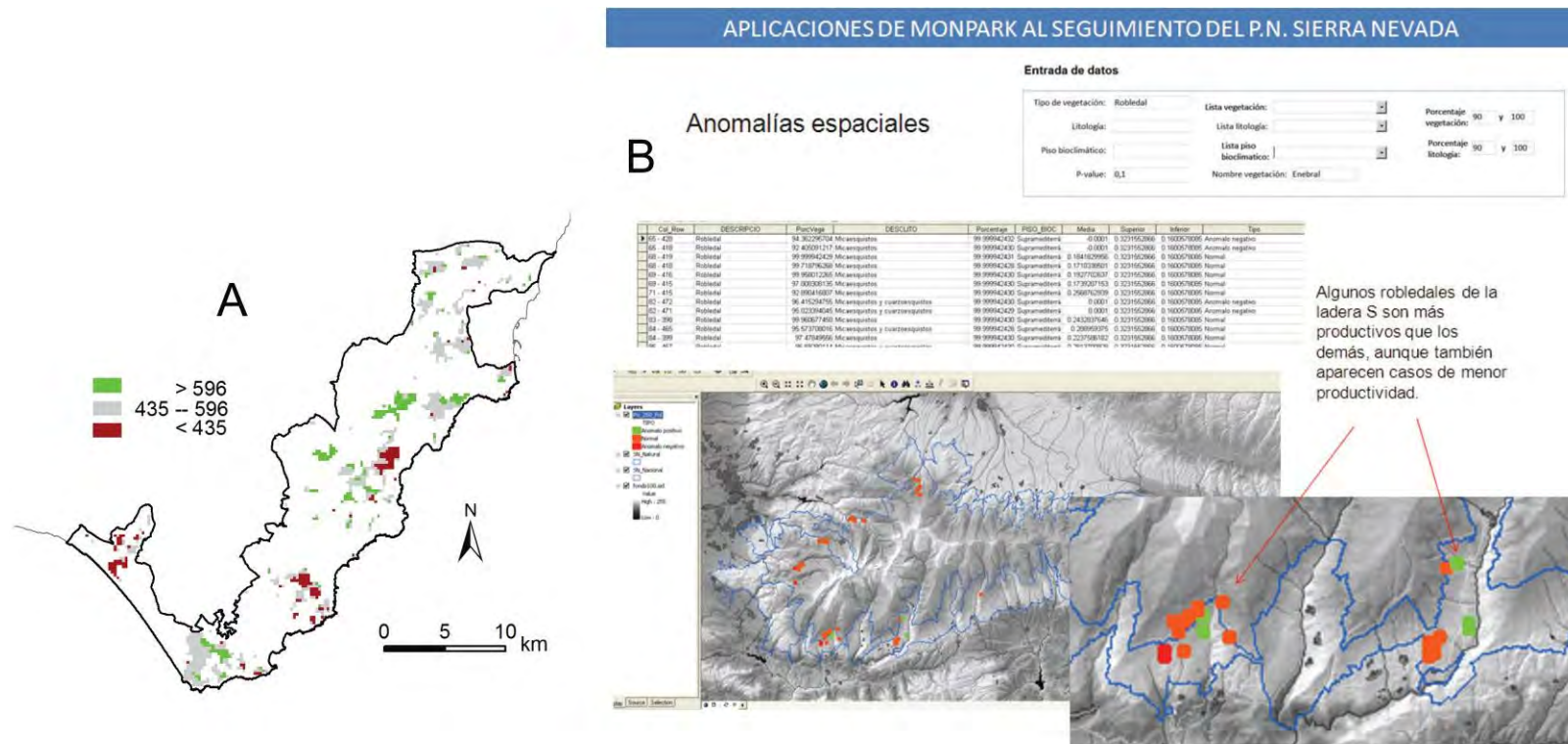


Figura 3.16. Mapa tipo 8. Anomalías espaciales en el funcionamiento de los ecosistemas.

Dos ejemplos: A) Anomalías espaciales en la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida anualmente (RFAA) del «matorral disperso» en el Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar. Las clases se establecen en función de los niveles de referencia, i.e. la variabilidad aceptada, para ese tipo de uso. El intervalo es definido es la media \pm una desviación estándar de la muestra seleccionada ($n=40$). Los píxeles son así clasificados según su valor esté dentro del intervalo (gris), por encima (verde) o por debajo del límite inferior del intervalo (marrón). Tomado de Oyonarte et al. (2010). UNESCO y Alcaraz-Segura et al. (2011). B) Anomalías estimadas para los robledales de Sierra Nevada con la plataforma Monparq. Podría regularse el % de pureza del píxel y seleccionar un umbral de p-value para identificar situaciones muy extremas (*outliers*) respecto al resto de píxeles para ese ecosistema.

4 El producto MOD13Q1 y su aplicación al seguimiento del funcionamiento de los ecosistemas de la Red de PPNN de España

En diciembre de 1999, la NASA lanzó el satélite TERRA con un sensor a bordo llama el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* o MODIS (Figura 4.1). Este satélite gira alrededor de la Tierra pasando sobre los polos, en una órbita que permite al sensor MODIS obtener diariamente imágenes de la mayor parte de la superficie de nuestro planeta. La órbita polar mantiene al Terra constantemente alineado con el Sol, de tal manera que todos los días pasa sobre cada lugar casi a la misma hora local, cerca de las 10:30 a.m. MODIS tiene también la capacidad para ver todo el mundo cada día en tres resoluciones diferentes (250m, 500m, y 1000m) con 36 bandas espectrales que capturan la información reflejada y emitida a través del espectro electromagnético, desde el visible hasta el térmico. Por los avances en la tecnología y el diseño específico que este sensor muestra, MODIS ofrece la mejor opción para el monitoreo de los ecosistemas. Actualmente, el empleo de datos MODIS está muy extendido, pudiendo decirse que el sensor está jugando un papel esencial en el desarrollo de modelos validados y globales del Sistema Tierra para la evaluación del impacto del cambio global y la elaboración de modelos que son usados en todo el mundo para la toma de decisiones.

Los datos que proporciona este sensor, se organizan en productos que están siendo utilizados por los científicos de diversas disciplinas (oceanografía, biología, ciencias de la atmósfera, etc.), para el estudio del cambio global. El primer desarrollo que se propone de la herramienta se basará en el producto MOD13Q1 que incluye los índices de vegetación NDVI (*Normalize Difference Vegetation Index*) y EVI (*Enhanced Vegetation Index*), aunque más adelante se podrían incorporar otros productos también relacionados con el funcionamiento ecosistémico.

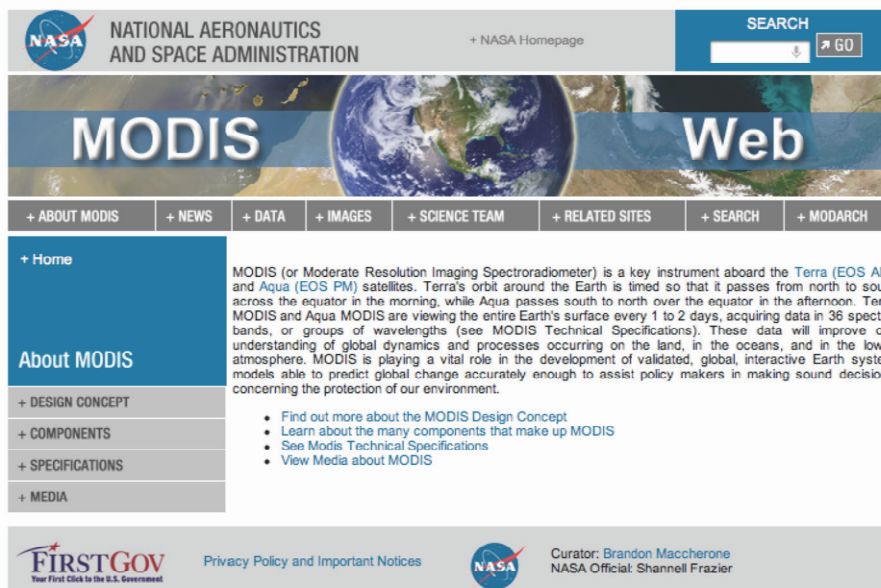


Figura 4.1. Página web principal del sensor MODIS.

El MOD13Q1 pertenece al grupo de productos MODIS de seguimiento de vegetación, aportando información sobre esta a través de los índices de vegetación (IV). El MOD13Q1 es un compuesto de 16 días y está generado a partir del producto diario L2G (nivel L2G) de reflectancia de la superficie. Los compuestos pretenden minimizar problemas tales como la presencia de nubes eligiendo los mejores valores dentro de ese período usando mediante el uso de un algoritmo que aplica uno de estos filtros basados en la calidad, geometría y presencia de nubes en los datos: el MVC, o de valor máximo, que elige el mejor valor de IV; o el CV-MVC, filtro de ángulo de visión seguido de máximo valor, que escoge los 2 valores mayores y de ellos selecciona el más cercano al nadir, reduciendo así la distorsión en los datos y dotando de mayor cohesión espacial a la imagen.

El objetivo es que cada píxel de la imagen tenga la máxima calidad posible y sea representativo del período de 16 días (Solano et al., 2010). La resolución espacial es de 250 metros. Contiene 12 capas de

datos, incluyendo las capas de los índices NDVI y EVI, así como una capa con información sobre calidad. Comenzó a generarse en el año 2000, y se ha ido agrupando en diversas colecciones, cada una con mejoras y resoluciones de errores y fallos de la anterior. Los productos usados en este trabajo pertenecen a la colección 5, la más reciente a día de hoy (Tabla 4.1.).

Nivel	Características
Level – 2	Son productos que contienen variables biofísicas generadas a partir de los productos L1B (nivel 1, imágenes originales calibradas y corregidas radiométricamente en unidades físicas) corregidas atmosféricamente y con aplicación de algoritmos bioópticos. Se almacenan en gránulos (corresponden a 5 minutos de datos captados por el sensor, 2340x2330 km aproximadamente).
Level – 2G	Contiene variables geofísicas proyectadas en una maya uniforme. Los datos se almacenan en tiles, cuadrículas de 1200 km en proyección Sinusoidal.
Level – 3	Productos derivados de variables geofísicas agrupados en compuestos de diferente duración. Los productos referentes a IV se encuentran en este nivel.
Level – 4	Productos generados con datos a partir de modelos de estimación de variables geofísicas como el índice de área foliar (IAF), y la producción primaria.

Tabla 4.1. Niveles de procesado de los datos MODIS

Dadas las características del sensor, los IV de MODIS permiten comparaciones espaciales y temporales consistentes de las condiciones de la vegetación mundial. Se utilizan muy frecuentemente, por tanto, para monitorear la actividad vegetal fotosintética terrestre, en apoyo de detección de cambios y de interpretaciones fenológicas y biofísicas. Algunas de las aplicaciones más comunes del IV tienen que ver con: 1) el calentamiento global; 2) el desarrollo de modelos biogeoquímicos e hidrológicos globales; 3) en agricultura de precisión, evaluación del estrés de los cultivos y cartografía de éstos; 4) en la previsión de suministro de agua para territorios dedicados al pastoreo y la evaluación de la capacidad de pastoreo; 5) evaluación de la deforestación y estudios de producción primaria neta; y en 6) contaminación y salud (e.g., fiebre del Valle del Rift, producción de mosquitos en los campos de arroz).

El NDVI de MODIS es conocido como "índice de continuidad" al existente NDVI de NOAA. El otro índice, EVI, tiene una sensibilidad mejorada debido a su capacidad de hacer mejores evaluaciones de la actividad de la vegetación en regiones con gran cantidad de biomasa, a través de un desacoplamiento de la señal de fondo del dosel y, al reducir su influencia de las condiciones atmosféricas. En realidad, ambos índices se complementan entre sí en los estudios de vegetación a nivel mundial y mejoran la extracción de parámetros biofísicos del dosel. Además de algunas correcciones en relación a la absorción del ozono y aerosoles, el empleo de modelos para el ajuste al nadir y a los ángulos solares estándar, los datos de MODIS incluyen etiquetas de evaluación de calidad (QA), que indicando la calidad del producto IV y de los datos de entrada.

Los productos de los índices de vegetación MOD13 de MODIS incluyen:

- NDVI y EVI de 250 m y QA de 8 días, 16 días y productos mensuales (resolución moderada)
- NDVI y EVI de 1 km y QA de 8 días, 16 días y productos mensuales (resolución estándar)
- NDVI y EVI de 25 km y QA de 8 días, 16 días y productos mensuales (baja resolución)

Para el desarrollo del programa de seguimiento de la Red de PPNN proponemos usar el primero de ellos, es decir los productos NDVI y EVI de 250 y QA de 16 días.

Los productos de MODIS se proveen de acuerdo con un sistema de celdas o "tiles" bajo proyección sinusoidal (Figura 4.2.). Estos tiles tienen 10° de lado y están georreferenciadas de acuerdo con un sistema de coordenadas que comienza en (0,0) (número de tiles horizontales, número de tiles en vertical) en la esquina superior izquierda y continua denominando hacia la derecha (horizontal) y hacia abajo (vertical). El tile en la esquina inferior derecha es (35,17).

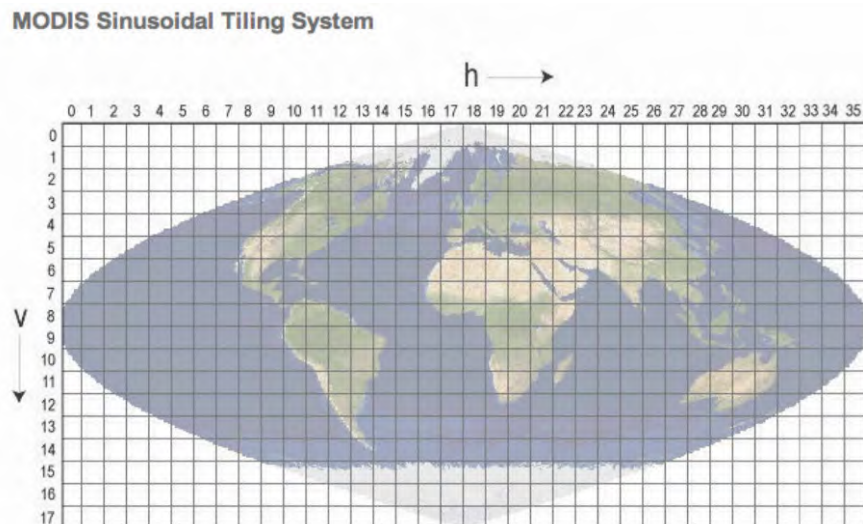


Figura 4.2. Sistema Sinusoidal de grillado de MODIS

Los productos MODIS tienen dos fuentes de metadatos:

- i) El sistema de metadatos HDF integrado: contienen información de los atributos globales y de conjuntos de datos específicos de los atributos relacionados con el gránulo. La estructura de estos metadatos es muy similar a la de un archivo de ASTER HDF, y se proporciona al usuario junto al producto MODIS.
- ii) El sistema externo de metadatos ECS: El archivo .met (generado por el sistema central EOSDIS) es un archivo de metadatos externo en formato XML, que se proporciona al usuario junto con el producto MODIS.

Algunas características clave de ciertos atributos de metadatos MODIS son los siguientes:

- El Xdim y Ydim representan las filas y columnas de los datos, respectivamente
- La proyección y ProjParams identifican la proyección y sus correspondientes parámetros de proyección
- La proyección sinusoidal se utiliza para la mayoría de los productos reticulares MODIS de la Tierra, y tiene una esfera exclusiva de medición 6371007.181 metros
- Los *Upper Left Point Mtrs* están en las coordenadas de la proyección, e identifica la esquina izquierda superior del mismo píxel superior izquierdo de los datos de imagen
- Los *Lower Right Mtrs* identifica la esquina inferior derecha del píxel situado más abajo y a la derecha de los datos de imagen. Estas coordenadas de proyección son los únicos metadatos que reflejan con precisión las esquinas de la imagen reticulada
- Además hay un BOUNDINGRECTANGLE y campos GRINGPOINT dentro de los metadatos, que representan la latitud y longitud del tile correspondiente a los datos

El conjunto de los datos contienen información SDS específica, tales como el rango de datos y los factores de escala aplicables para los datos. Los productos de datos LP DAAC proporcionan estos detalles en un documento conciso para cada uno de los productos. Un archivo HDF-EOS también contiene metadatos EOS útil para los servicios de búsqueda de EOS. Cualquier herramienta que procesa los archivos estándar de HDF puede leer un archivo HDF-EOS. Sin embargo, es conveniente tener un conocimiento de las estructura de los archivos para interpretarlos.

5 Procesamiento de los datos y arquitectura del sistema

5.1 Adquisición de los datos

5.1.1 Adquisición de los datos de la imagen: descarga y actualización de las imágenes

En este subsistema se muestra cómo descargar el producto MODIS de forma automatizada y versátil así como el procedimiento para realizar un filtrado por calidad de las imágenes.

Para hacer la descarga de las imágenes MODIS se propone usar el lenguaje de programación R (<http://cran.r-project.org/>). Este procedimiento se puede realizar por dos vías distintas:

- A) Siguiendo la metodología propuesta en la web <http://spatial-analyst.net>;
- B) Utilizando el siguiente código directamente en R, escrito por Domingo Alcaraz-Segura (Opción recomendada, Cuadro 5.1.):

```
## Instalar paquete MODIS ##http://www.wuala.com/IVFL/R_MODIS/
install.packages("MODIS", repos="http://R-Forge.R-project.org",dep=T)
## Cargar libreria MODIS
library(MODIS)
## Comprobar si las imágenes deseadas ya han sido descargadas previamente (OBLIGATORIO)
## Modificar la ruta, las fechas y el TILE
checkAV(LocalArcPath="F:\\IMAGENES\\MODIS\\MOD13Q1\\",product="MOD13Q1",startdate="2000.01.01",enddate="2011.12.31",tileH=17,tileV=5)#4:5
## Descargar todas las imágenes
## Modificar la ruta, las fechas y el TILE
getHDF(LocalArcPath="F:\\IMAGENES\\MODIS\\MOD13Q1\\",product="MOD13Q1",startdate="2011.01.01",enddate="2011.12.31",tileH=17,tileV=5,collection=005)
## Instalar paquete RCurl - http://r-gis.net/?q=ModisDownload
install.packages("RCurl",dep=T)
## Cargar libreriaRCurl
library(RCurl)
## Cargar funciones de descarga de MODIS
source("http://r-gis.net/ModisDownload/ModisDownload.R")
#Aconsejable descargar el archivo al disco desde "http://r-gis.net/ModisDownload/ModisDownload.R"
#source("F:\\IMAGENES\\MODIS\\MOD13Q1\\ModisDownload.R")
## Directorio de trabajo y de destino de las imagenes
setwd("F:\\IMAGENES\\MODIS\\MOD13Q1\\ORIGINALES")
## Direccion ftp de origen del producto MODIS deseado
FTP<-"ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD13Q1.005/"
## Descargar imagenes del tile deseado para los año(s) requerido(s)
## Por ejemplo: descargar el tile h17v05 para los años 2010 y 2011
ModisDownload(FTP=FTP,h=17,v=5,dates=c('2010.01.01','2011.12.31'),mosaic=F,proj=F)
```

Cuadro 5.1. Ejemplo de script en R para bajar las imágenes MODIS.

Puesto que el sistema de tiles de MODIS divide España en 5 piezas, para una sola fecha, se tienen 5 imágenes MOD13Q1 que comprenden todo el país (Figura 5.1.). El nombre de estos tiles se codifica en función de la posición que ocupan en una rejilla. Para España, los tiles son:

- 1) Mitad Norte de la Península Ibérica: 'h17v04'
- 2) Mitad Sur de la Península Ibérica: 'h17v05'
- 3) Nordeste de la Península Ibérica: 'h18v04'
- 4) Islas Baleares: 'h18v05'
- 5) Islas Canarias: 'h16v06'

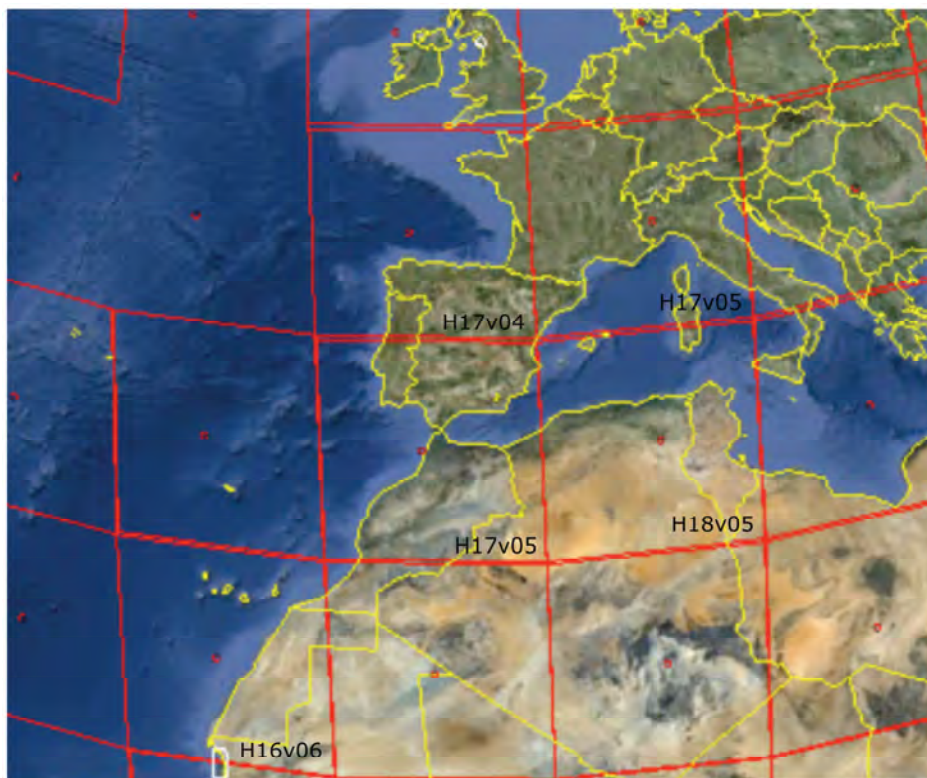


Figura 5.1. Tiles del sistema sinusoidal de MODIS que ocupan el territorio español.

El script de descarga debe ejecutarse una vez para cada tile. Se propone los siguientes pasos para la descarga de las imágenes MODIS:

- 1) Conectarse al servidor de imágenes MODIS.
- 2) Consultar las imágenes que existen para MOD13Q1 en ese momento.
- 3) Comprobar si todas las imágenes que existen en el servidor MODIS ya están descargadas en el servidor donde se pretende trabajar.
- 4) Bajar las imágenes que todavía no están en el servidor.

La primera vez que se ejecute este comando, se descargará todo el archivo (serie temporal) MODIS. Después, según MODIS vaya generando y poniendo en su servidor nuevas imágenes, sólo se descargarán en el servidor esas nuevas imágenes, para así mantenerlo actualizado. La automatización del proceso de descarga se hará con el flujo de trabajo Kepler.

5.1.2 Adquisición de los datos de referencia: caracterización ecológica de los píxeles

A) Aproximación vectorial

- 1) CREACIÓN DE UNA REJILLA VECTORIAL

Los datos procedentes de las imágenes de satélite aparecen dispuestos en formato ráster en unidades espaciales denominadas "píxeles". Sin embargo, la información ecológica de referencia que puede usarse para caracterizar los píxeles suele estar disponible en formato vectorial, por lo que será necesario crear una estructura que permita conectar ambos tipos de información. Tras la experiencia adquirida por nuestro grupo, pensamos que la forma más robusta de hacer esto es a través de la creación de una retícula vectorial cuyas unidades sean polígonos correspondientes en la forma y geo-localización a los píxeles. De esta forma es posible superponer la información ecológica de referencia procedente de coberturas espaciales con la información sobre atributos funcionales que derivamos de las imágenes de satélite.

La construcción de la retícula se podrá hacer con cualquier SIG, aunque proponemos el uso de GRASS/Quantum GIS, un software libre de gran potencialidad. Las características y pasos fundamentales para la construcción de la retícula son:

- La retícula deberá tener, por tanto, una resolución espacial igual a la de los píxeles de la imagen MODIS (231.656358263958 x 231.656358263958 metros) y habrá que situarla espacialmente seleccionando las coordenadas (en ArcMap se usa la herramienta FISHNET).
- A cada píxel se le añadirá en la tabla de atributos un ID correspondiente a su posición en el tile, que denominamos ID universal, porque si se mantiene como atributo del píxel en todas las etapas de procesamiento, permitirá su localización y la actualización de la información espectral más fácilmente.
- Además, es conveniente añadir también una nueva columna con el área de cada píxel.

2) SELECCIÓN DE PÍXELES PARA CADA ESCALA DE ESTUDIO

Dependiendo del nivel espacial de estudio que queramos emplear, la selección de píxeles variará. En cualquier caso, el procesamiento de las imágenes y, por tanto, la obtención de los atributos funcionales derivados de los índices espectrales, deberá hacerse para los tiles completos (referenciando la información a la retícula completa), y sólo cuando queramos proyectar los resultados del procesamiento a uno de los niveles de estudio: nacional, Red de PPN o ecosistema tendremos que proceder a la selección de píxeles.

La selección de píxeles se puede realizar a 3 niveles: tile, PPNN y ecosistemas. Si lo que interesa es el nivel nacional habrá que intersectar (*overlay*) con el mapa del territorio español (Península Ibérica e islas). Si por el contrario se quiere mostrar o trabajar con la información a nivel de Red habrá que intersectar la retícula con los polígonos correspondientes a dicha red (Tabla 5.1.). Finalmente, si se quiere trabajar nivel de ecosistema, se tendrá que intersectar con las coberturas que se empleen en cada caso (Parque) para la identificación de los ecosistemas.

Parque	Extensión (ha)	Nº píxeles MODIS 250m
Doñana	54.000	8.640
Sierra Nevada	86.000	13.760
Cabrera	1.000	160
Tablas de Daimiel	1.900	304
Cabañeros	41.000	6.560
Monfragüe	18.000	2.880
Picos de Europa	64.000	10.240
Ordesa	15.000	2.400
Aigüestortes	14.000	2.240
Islas Atlánticas (incluye mar)	8.000	1.280
Caldera de Taburiente	4.000	640
Garajonay	4.000	640
Teide	19.000	3.040
Timanfaya	5.000	800
Total píxeles a analizar		53.584

Tabla 5.1. Nº de píxeles existentes que corresponden a cada PPNN. Se considera que el número mínimo de píxeles necesarios para realizar un análisis fiable de los datos de observación de la Tierra es de 10 píxeles.

Para trabajar a escala de ecosistema será necesario identificar los píxeles representativos de cada uno de ellos en el interior de un Parque. Esta labor de identificación variará en función de la información disponible para cada Parque, y se deberá ser tan exigente como se desee o la información disponible lo permita. Por ejemplo, para el caso de los Parques de Andalucía, nuestro equipo suele usar la información de tres coberturas diferentes: mapa litológico a escala 1:50000, mapa de vegetación a escala 1:10000, y el sistema de información de uso del suelo de España (SIOSE, 1:10000). El empleo de estas tres coberturas nos permite ser muy exigentes en la identificación del tipo de ecosistema, lo que resulta muy conveniente para la correcta interpretación de la información funcional que generamos a escala regional, y que ésta pueda ser contrastada con los datos que otros programas de seguimiento o estudios generan a escala de parcela.

Puesto que la selección del tipo de ecosistema al que pertenece un píxel está influenciada por el grado de “pureza” de las diferentes propiedades ambientales (e.g., tipo de vegetación, tipo de litología, tipo de uso del suelo) que caracterizan cada ecosistema, se podrán especificar criterios de búsqueda complejos, como el establecimiento de umbrales del porcentaje de la extensión que cada una de esas propiedades en el píxel. Esta operación se puede realizar a través de scripts realizados con el lenguaje de programación R como el que aparece en el cuadro 5.2., aunque existen otras alternativas como usar consultas SQL en un programa de SIG. Lo ideal puede ser elegir un grado de pureza superior a 70%, un porcentaje superior puede reducir enormemente el número de píxeles para el ecosistema en cuestión, y por tanto, perder poder estadístico. Por el contrario, un porcentaje inferior podría estar indicando situaciones mixtas como los mosaicos sucesionales de la vegetación. En cualquier caso este porcentaje podría variar de acuerdo con el objetivo e estudio. Nuestro grupo de investigación dispone de protocolos para la asignación de píxeles a ecosistemas en Andalucía, de acuerdo con diferentes fuentes de información ambiental.

```
data<-read.table(file = "F:/parque1/ecosistema1.txt", header = T, sep = "\t")
attach(data)
sumasio<-function(a,b,c,d){a+b+c+d}
sumasio(Other,MixOth,GraDeOth,GraSpOth)
sumalito<-function(e,f,g,h,i,j,k){e+f+g+h+i+j+k}
sumalito(Clay_Silt,Murlstones,Limestones,Conglomerata,Phyllites,Others_out,Sandstones)
sorbas_gypmix<-which(sumasio(Other,MixOth,GraDeOth,GraSpOth)<10&
sumalito(Clay_Silt,Murlstones,Limestones,Conglomerata,Phyllites,Others_out,Sandstones)<10&
Gypsum_out>70&MixNat>70&VegGypMix>70)
ecosistema<-data[which(sumasio(Other,MixOth,GraDeOth,GraSpOth)<10&
+ sumalito(Clay_Silt,Murlstones,Limestones,Conglomerata,Phyllites,Others_out,Sandstones)<10&
+ Gypsum_out>70&MixNat>70&VegGypMix>70),]
write.table(ecosistema,file="ecotipo1.txt")
```

Cuadro 5.2. Ejemplo de script en R para seleccionar píxeles de ecosistemas de aljezar (correspondientes a afloramientos de yesos) en el sureste ibérico cumpliendo con la condición de que la extensión de la siguientes propiedades en los píxeles sea superior al 70%: litología de yesos, vegetación mixta (matorral y espartal) y uso del suelo natural.

Puede ocurrir, que como parte del sistema de seguimiento haya áreas de determinados parques que por alguna razón tengan más interés de estudio de que otras. Este puede ser el caso, por ejemplo, de la necesidad de verificar el aumento de la cobertura vegetal tras un incendio, o cualquier otra situación que se considere conveniente. Para ello se deberán obtener las coordenadas mediante GPS de los sitios de interés y se añadirá en el laboratorio esa información al SIG creado. Además, siempre que sea posible se deberá comprobar visualmente que la selección de los píxeles es correcta de acuerdo con una ortofoto (e.g., para Andalucía ir al servicio WMS de la REDIAM).

3) ASIGNACIÓN DE LOS DATOS DE REFERENCIA A LOS PÍXELES

Como en el caso del procesamiento de la imagen, la experiencia nos dicta que los más sencillo es caracterizar todos y cada uno de los píxeles con la información proveniente de los diferentes mapas ambientales empleados, y crear tantos campos con esta información en la tabla de atributos de la retícula vectorial, como sea necesario y de acuerdo con las diferentes escalas de estudio. De esta forma, mientras que puede no ser necesario indicar propiedades de los píxeles a escala nacional (excepto por ejemplo, si se desea indicar que pertenecen a la Península o las islas), se deberá crear un campo para asociar cada píxel al Parque al que pertenece. Con respecto a la información a nivel de ecosistema se

podrán incorporar tantos campos como información ecológica (vegetación, litologías, uso del suelo, etc.) exista para cada parque. Una vez incorporada toda esta información a la base de datos, podrán especificarse criterios de búsqueda como hemos indicado en el apartado anterior. Otro tipo de información ambiental que se puede asignar a los píxeles es la altitud, pendiente, orientación, etc.

B) Aproximación ráster

En el caso de se preferir trabajar con los mapas en formato ráster en lugar de vectores, se deberá transformar la retícula y los vectores correspondientes a la información ambiental (e.g., litología, vegetación, SIOSE) a un ráster de tipo clases con valores enteros e indicando un tamaño del píxel del orden del error espacial de las cartografías de los ecosistemas.

El ráster de salida de la retícula tendrá tantas clases como píxeles MODIS. El ráster de salida de ecosistemas tendrá tantas clases como ecosistemas. El número de píxeles de ambos los ráster será igual y el tamaño de esos píxeles será del tamaño del píxel MODIS (231.65635826395/10 m).

Después se debe hacer un “tabulate areas-mejorado” para cada clase de la rejilla, se tendrá cuántas clases de ecosistemas hay y que área ocupan en cada píxel. Así se obtendrá un nuevo ráster multibanda (con tantas bandas como ecosistemas) en el que cada banda tendrá en cada píxel el porcentaje de su superficie que es ocupado por un determinado ecosistema.

Por ejemplo, banda pinos: aparecerá en cada píxel el porcentaje de pinos de 0 a 100%. Así se podrá ver las áreas ocupadas por pinos.

5.2 Pre-procesado de la imagen

5.2.1 Filtrado por calidad

La calidad de información obtenida mediante teledetección puede verse alterada por las condiciones en las que se tomaron los datos, por lo que el procesado de las series temporales requiere tener en cuenta la calidad de los datos que las forman (Justice & Townshend, 2002).

La evaluación de la calidad (QA, *Quality Assessment*) informa sobre las condiciones bajo las que se ha adquirido y procesado la información científica contenida en los datos MODIS (Solano et al., 2010). Es un proceso llevado a cabo por el MODIS *Land Science Team* (MODLAND ST), que es el organismo encargado de generar los algoritmos y software de procesamiento que se usan en la generación de productos MODIS, con el objetivo de asegurar la correcta interpretación de sus productos. El MODLAND ST está apoyado en esta tarea por el MODIS *Land Data Operational Product Evaluation* (LDOPE), formado por un pequeño equipo científico y técnico cuya tarea es coordinar y desarrollar la evaluación de la calidad de los productos MODIS (Roy et al., 2002).

Esta información, se incorpora en los productos MODIS en forma de capas o bandas. La capa llamada “250m 16 days VI Quality detailed QA” consta de un código binario de 16 bits para cada píxel de la imagen que contiene la información sobre los diferentes factores que estuvieron presentes en el momento de la adquisición de los datos, tales como cantidad de aerosoles, presencia de nubes, hielo o sombras (Tabla 5.2.).

Además, en la última versión (Collection 5) del producto MOD13Q1 se ha añadido una capa resumen de la calidad (*Pixel Reliability*), que engloba toda la información de la capa QA en 5 niveles (Tabla 5.3.).

Las imágenes MODIS pueden ser filtradas con la capa QA para detectar y eliminar aquellos píxeles con mala calidad. El proceso de filtrado se basa en “leer” los bits referentes a la calidad de cada píxel, decodificarlos y detectar aquellos con una calidad inferior al nivel deseado, descartándolos para el análisis (Tabla 5.3.).

Una vez detectados los píxeles con mala calidad, hay que establecer qué hacer con ellos. Para esto, el valor de Índice de Vegetación (IV) de los píxeles que no cumplen las condiciones de calidad requeridas por el usuario es alterado por el script de dos modos distintos:

- El valor de IV se transforma a NAN (*Not A Number*): en aquellos píxeles detectados por los filtros referentes a cantidad de aerosoles, nubes, sombras y UsefulnessIndex. El valor de IV es eliminado de la serie temporal ya que debido a la naturaleza del factor filtrado, es imposible conocer la naturaleza del píxel (ya que podría ser un píxel de vegetación, pero podría ser también algún tipo de construcción u otro elemento). Ante esta incertidumbre resulta adecuado descartar ese píxel.
- El valor de IV se transforma en “0”: es el caso del filtro referente a presencia de hielo/nieve. Independientemente de naturaleza del píxel, si este está cubierto de nieve, su valor de EVI es 0 desde un enfoque conservador, ya que la presencia de nieve no permite que la vegetación que pueda estar bajo ella fotosíntesis. En este caso, la imagen con estadísticas de pérdida muestra la cantidad de fechas para cada píxel en los que su valor ha sido transformado (no eliminado) a 0.

Bit	Nombre	Valor	Descripción
0-1	MODLAND_QA	00	IV producido, buena calidad
		01	IV producido, comprobar otro QA
		10	Píxel producido, probablemente nublado
		11	Píxel no producido por razones ajenas a las nubes
	2-5 IV usefulness	0000	Calidad más alta
		0001	Calidad inferior
		0010	Calidad decreciente
		0100	Calidad decreciente
		1000	Calidad decreciente
		1001	Calidad decreciente
		1010	Calidad decreciente
		1100	Calidad más baja
		1101	Calidad tan baja que no es útil
		1110	Faltan datos en el nivel L1B
1111	No útil por otra razón		
6-7	Cantidad de aerosoles	00	Climatología
		01	Baja
		10	Media
		11	Alta
8	Nubes adyacentes	0	Si
		1	No
9	Corrección BRDF	1	Si
		0	No
10	Nubes mixtas	1	Si
		0	No
11-13	Tierra/agua	000	Aguas oceánicas someras
		001	Tierra (únicamente)

Bit	Nombre	Valor	Descripción
		010	Costas (océanos y lagos)
		011	Aguas continentales someras
		100	Aguas continentales someras
		101	Aguas efímeras
		110	Océano (continental)
		111	Océano (profundo)
14	Posible nieve/hielo	1	Si
		0	No
15	Posible sombra	1	Si
		0	No

Tabla 5.2. Contenido de la capa QA del producto MOD13Q1.

Código	QA resumen	Descripción
0	No hay datos	No procesado
-1	Calidad Buena	Usar con confianza
1	Calidad media	Útil, pero consultar otra información QA
2	Nieve/Hielo	Cobertura de nieve
3	Nubes	Cobertura de nubes

Tabla 5.3. Contenido de la capa "Pixel Reliability"

El filtrado puede realizarse mediante un script diseñado en R, para que pueda ir adaptándose a las actualizaciones futuras de los productos MODIS. El script debe incluir y contemplar ciertas funciones básicas:

- 1) Modificar las rutas de entrada (los archivos .hdf descargados) y salida (archivos resultantes del filtrado).
- 2) Elegir la banda a filtrar. El producto MOD13Q incluye una banda para cada IV: NDVI y EVI.
- 3) Seleccionar el período de la serie temporal que se pretende analizar, indicando el año de comienzo y de fin. El script debe leer el año de cada imagen (presente en el nombre del archivo). Además debe indicarse la cantidad de compuestos que conforman un año, 23 en el caso de MOD13Q1 (365/16 días).
- 4) Elegir los criterios de calidad deseados: el script debe permitir filtrar mediante todos los criterios incluidos en la capa QA. Pudiéndose realizar con uno solo o una combinación de ellos:
 - a. *Usefulness Index*: es un resumen de la calidad del píxel, basado en el resto de criterios. Presenta 11 niveles distintos de calidad aunque pueden hacerse rangos de estos niveles para aumentar su utilidad. Este criterio debe filtrarse de forma independiente y no combinarse con los demás;
 - b. *Aerosol quantity*: este criterio está relacionado con la concentración de aerosoles. El nivel *Climatology* etiqueta píxeles en los que no se tiene información sobre los aerosoles para una determinada fecha, por lo que ese valor se extrapola de datos de series climatológicas, por lo que puede descartarse del proceso de filtrado. Para los 3 niveles restantes de este criterio se recomienda usar operadores lógicos "menor o igual" (*less equal*, *le*), para conseguir niveles de filtrado jerarquizados en los que cada uno incluya al anterior. Filtrando el nivel 1 (*le1*, *less equal 1*) solo se consideran de

buena calidad los píxeles con concentraciones bajas, filtrando aquellos con concentraciones medias y altas, por lo que es el más estricto. El nivel 2 (le2) considera de buena calidad píxeles con concentraciones bajas y medias, filtrando solo las altas. El nivel "le3" no realiza ningún filtrado ya que considera píxeles de calidad aquellos etiquetados como altas, medias y bajas concentraciones;

- c. *Adjacent Clouds*: este filtro hace referencia a las nubes adyacentes. Filtra aquellos píxeles en los que alguno de sus píxeles colindantes es nuboso, o probablemente nuboso. Este criterio tiene carácter binario, es decir, no presenta niveles sino apagado o encendido;
 - d. *Mixed Clouds*: detecta aquellos píxeles con nubes mixtas. Para el cálculo de los IV, se usan las bandas roja y NIR (originalmente 250 metros de resolución espacial), que deben agregarse a 500 metros antes del cálculo. Si alguno de los píxeles que forman el agregado de 500 metros tenía presencia de nubes, el agregado se indicará como positivo para la presencia de nubes. Binario;
 - e. *Shadow*: informa sobre la posible presencia de sombras. Binario;
 - f. *Land/Water*: informa sobre si el píxel es de suelo, o por el contrario es un píxel con presencia de agua (por lo que el IV no se computa), un océano, aguas continentales, aguas someras, etc. Tiene 7 niveles;
 - g. *Ice*: filtra los píxeles con posible presencia de hielo o nieve. Binario.
- 5) Además de las imágenes filtradas, el script debe ofrecer como resultado añadido una imagen con las estadísticas de pérdida de información consecuencia de este. La imagen representa todo el período analizado y el valor de cada píxel es el número de fechas, que han pasado el filtro con éxito o por el contrario, las fechas que no superaron las exigencias de calidad. Con esta información, el usuario es capaz de conocer el efecto de un determinado filtrado en el área de estudio, determinando si ese filtro es adecuado o tiene un mal funcionamiento por exceso o defecto.

Con el fin de conseguir un filtrado eficiente y adaptado a cada área y período a analizar, se recomiendan una serie de aspectos avanzados que el script de filtrado debería incluir, si bien no son totalmente indispensables:

- 6) Si se tienen todas las imágenes de la serie temporal juntas en un mismo directorio de trabajo es importante indicar en el script el tile, es decir, la región en la que se pretende realizar el filtrado, resultando este más rápido y específico. Por lo tanto, resulta muy útil que el script contemple esta opción.
- 7) Es interesante que el script permita realizar el filtrado únicamente a un período concreto dentro de cada año de la serie temporal. Hay que introducir los años y días de inicio y fin de la estación o período de interés, por ejemplo, si se pretende filtrar solo los compuestos pertenecientes al invierno, o a un período de crecimiento de una especie en concreto. Los elementos a detallar son:
- a. Año de comienzo del primer ciclo o estación. Es igual al año de comienzo de la serie temporal de interés.
 - b. Año de fin del primer ciclo o estación. Debe ser igual primer año del primer ciclo o un año más (en el caso de querer filtrar un ciclo que comprenda el final de un año y el comienzo de otro).
 - c. Compuesto en el que comienza el ciclo o estación. Es la fecha de comienzo del primer compuesto en días julianos.
 - d. Compuesto en el que finaliza el ciclo o estación. Es la fecha del compuesto en el que termina el ciclo en días julianos. Para un filtrado por fechas (compuesto a compuesto) se debe repetir el proceso tantas veces como compuestos se quieran filtrar, modificando el día de comienzo y final de ciclo en cada filtrado. Para filtrar todos los

compuestos de todo el período juntos, el compuesto inicial debe ser el primero del año, y el compuesto final el último del año, siempre en días julianos.

El diseño del script debe realizarse teniendo como meta la versatilidad del mismo a la hora de realizar diferentes filtrados y en diferentes áreas dentro del territorio nacional. Los criterios de filtrado deben ser establecidos por el usuario en función de las características de la zona a estudiar y como resultado de un proceso de adecuación del filtrado tras diversas pruebas. El objetivo debe ser encontrar un equilibrio entre la máxima exigencia en cuanto a calidad de los píxeles y la mínima cantidad de información perdida. El filtrado mediante criterios referentes a aspectos concretos (aerosoles, nieve, nubes, etc.) ya sean de forma individual o combinada, requiere mayor dedicación en tiempo y trabajo para conseguir esta adaptación. Un método más rápido y sencillo es usar el criterio *Usefulness Index*, agrupando sus categorías en 3 o 4 bloques, lo que facilita en gran medida el filtrado.

Una alternativa es aplicar la metodología propuesta en el blog de Luis Cayuela (1ª parte y 2ª parte), llevada a cabo en R, en la que en lugar de usar la capa QA, el filtrado se realiza con la información contenida en la capa *Pixel Reliability*, mucho más sintética. Esta metodología reduce además el tiempo de procesamiento, ya que el filtrado solo se realiza en los píxeles seleccionados o de interés en lugar de filtrar la imagen completa. Como inconveniente, presenta incertidumbre en los resultados del filtrado por lo que se desaconseja esta metodología.

<p>1. FUNCTION MODQ_USE,Qb#VI Usefulness-Bits[2-5]: 0000HighQ, 0001LowerQ, 0010LessQ, 0100LessQ, 1000LessQ, 1001LessQ, 1010LessQ, 1100LowestQ, 1101NotUseful, 1110L1BFault, 1111NotProcessed jj=(Qb AND 60)#Bitwise AND using 111100: 0HighQ, 1LowerQ, 2LessQ, 4LessQ, 8LessQ, # 9LessQ, 10LessQ, 12LowestQ, 13NotUseful, 14L1BFault, 15NotProcessed kk=jj / (2^2)#Shift 2 positions totheright RETURN,kk END</p>
<p>2. FUNCTION MODQ_AER,Qb#Aerosol quantity-Bits[6,7]: 00Climatology, 01Low, 10Average, 11High Aerosol quantity jj=(Qb AND 192)#Apply bitwise AND using 11000000: 0Climatology, 1Low, 2Average, 3High Aerosol quantity kk=jj / (2^6)#Shift 6 bit positions to the right RETURN,kk#Result: 00=0=Climatology# 01=1=Low 10=2=Average 11=3=High END</p>
<p>3. FUNCTION MODQ5_ADJCLD,Qb#Adjacent cloud detected-Bit[8]: 0No, 1Yes =OLD MODQ5_CLA jj=(Qb AND 2^8)#Bitwise AND using 100000000 : 0No, 1Yes kk=jj / (2^8)#Shift 8 positions to the right RETURN,kk END</p>
<p>4. FUNCTION MODQ_BRDF,Qb#Atmospheric BRDF correction-Bit[9]: 0No, 1Yes jj=(Qb AND 2^9)#Bitwise AND using 1000000000 : 0No, 1Yes kk=jj / (2^9)#Shift 9 positions to the right RETURN,kk END</p>
<p>5. FUNCTION MODQ5_MIXCLD,Qb#Mixed cloud-Bit[10]: 0No, 1Yes = OLD MODQ5_CLO jj=(Qb AND 2^10)#Bitwise AND using 10000000000: 0No, 1Yes kk=jj / (2^10)#Shift 10 positions to the right RETURN,kk#Result: 000100=4=No nubes, sólotierra, no nieve, no sombras END</p>

<pre> 6. FUNCTION MODQ5_LND,Qb#Tierra/agua - Bits [11-13]: 000ShallowOcean, 001Land, 010Coastline, 011ShallowInlandWater, 100EphemeralWater, 101DeepInlandWater, 110ContinentalOcean, 111DeepOcean jj=(Qb AND 14336)#Bitwise AND using 11100000000000: 0ShallowOcean, 1Land, 2Coastline, 3ShallowInlandWater, 4EphemeralWater, 5DeepInlandWater, 6ContinentalOcean, 7DeepOcean kk=jj / (2^11)#Shift 11 positions to the right RETURN, kk END </pre>
<pre> 7.FUNCTION MODQ5_ICE, Qb#Possible Snow/ice-Bit[14]: 0No, 1Yes jj=(Qb AND 16384) #Bitwise AND using 10000000000000: 0No, 1Yes kk=jj / (2^14) #Shift 14 positions to the right RETURN, kk END </pre>
<pre> FUNCTION MODQ5_SHA, Qb#Possible shadow-Bit[15]: 0No, 1Yes jj=(Qb AND 32768) #Bitwise AND using 100000000000000: 0No, 1Yes kk=jj / (2^15) #Shift 15 positions to the right RETURN, kk END </pre>

Cuadro 5.3. Extracto de script en R, como ejemplo para detectar los píxeles con mala calidad y substituir sus valores por NAN o 0.

5.2.2 Relleno de huecos en la serie temporal

Las series temporales filtradas muestran fechas en las que no hay dato de IV ya que ha sido eliminado durante el proceso de filtrado. Un alto número de estos huecos puede provocar resultados menos fiables en próximos cálculos. Es posible “rellenar” estos huecos mediante técnicas de interpolación, que usan la información de la serie temporal para ello.

Con el lenguaje R resulta sencillo realizar este tipo de interpolación, en las que el resultado de introducir la serie temporal con fechas sin valor de IV, o NANs, es una serie temporal sin huecos usando la técnica de vecino más próximo o la de *cubic spline*:

- 1) *Vecino más próximo*: se basa en un algoritmo simple que calcula el valor de la fecha faltante usando los valores para la misma fecha de las series más cercanas. Este método presenta el inconveniente de soportar un número máximo de datos faltantes (80% por defecto en la función de R), por lo que si el filtro elimina muchas fechas esta interpolación no funcionará. La función se encuentra dentro del paquete *pamr*, y se llama *pamr.knnimpute()*.
- 2) *CubicSpline*: método no paramétrico de interpolación. Al ser un método segmentario no utiliza un único polinomio para la totalidad de los datos, si no que calcula uno entre cada par de datos en los que haya un hueco. Completa los huecos usando datos próximos de la misma serie a lo largo del tiempo. La función *spline()* se encuentra dentro del paquete *stats*. Basta introducir los vectores que contienen los datos para interpolar de nuestro data set (*x* e *y*) y los valores que van a ser interpolados (NaNs en este caso) para que la función calcule el polinomio adecuado a cada intervalo con dato faltante y devuelva el valor interpolado.

5.3 Cálculo de los atributos que se emplearán como indicadores del funcionamiento ecosistémico: condiciones de referencia

A partir de las imágenes de los compuestos de 16 días de índice de vegetación (ya filtrados y también sin filtrar), el siguiente paso es calcular distintos atributos descriptores que resumen la variabilidad temporal y que puedan usarse como indicadores. Se seguirán los siguientes pasos:

1. Cálculo de las curva del año medio
2. Cálculo de la variabilidad interanual asociada a la curva de año medio

3. Cálculo de los atributos funcionales para cada año y para el año medio
4. Cálculo de la media interanual de los atributos funcionales
5. Cálculo de la variabilidad interanual de los atributos funcionales

1 y 2. En primer lugar, se calculará la curva del año medio y su variabilidad interanual para todos los píxeles de la imagen y los dos índices de vegetación. Para cada fecha de los compuestos MODIS (e.g., primera imagen de enero) se calculará la media entre todos los años disponibles para esa fecha. Conjuntamente a la media, también se calcularán el desvío estándar interanual, el coeficiente de variación inter-anual, el máximo histórico y el mínimo histórico para esa fecha. Estas operaciones son sencillas de hacer con cualquier lenguaje de programación. Por ejemplo, en R puede usarse el paquete `raster`. Es conveniente evitar bucles a través de filas y columnas para calcular estas variables porque ralentizan mucho el procesamiento. Existen formas implementadas en R de operaciones matriciales que son mucho más rápidas porque ya son algoritmos optimizados para eso. Por ejemplo, para calcular la media se puede hacer un bucle en el que se vayan sumando las imágenes y después dividirlo por el número de imágenes. Un ejemplo de la aproximación de cálculo píxel a píxel que no se recomendada puede verse en este post del blog de Luis Cayuela (<http://luiscayuela.blogspot.com/2009/04/estima-de-los-atributos-funcionales-de.html>) o en el cuadro 5.4. Un ejemplo de cómo se debería programar el cálculo de los atributos funcionales de forma simultanea en toda la imagen puede verse en el cuadro 5.5.

```
install.packages("timeSeries",dep=T)
library(timeSeries)
nrows<- nrow(Imagen)
ncols<- ncol(Imagen)

Medialmg<- array(dim=c(nrows,ncols))
CVlmg<- array(dim=c(nrows,ncols))
MMAX <- array(0,dim=c(nrows,ncols))
by <- timeSequence(from = start(as.timeSeries(EVIts)), to = end(as.timeSeries(EVIts)), by = "year")
for(i in 1:nrows) {
  for(j in 1:ncols) {
    EVIts<-ts(PIRotada[i,j],start=c(2001,1),frequency=12)
    MediaAnual<-mean(aggregate(as.timeSeries(EVIts), by, mean),na.rm=T)
    CVAnual<-mean(aggregate(as.timeSeries(EVIts), by, cv),na.rm=T)
    MMAX<-sapply(phenoPhase(EVIts, mon.range = c(1, 12)),[1:2],mean)[2]
    MAX <-...
    MIN <-...
    MMIN, etc.

    Medialmg[i,j] <- MediaAnual
    CVlmg[i,j]<- CVAnual
    CVlmg[i,j]<-MMAX
  }
}
```

Cuadro 5.4. Ejemplo de script en R para estimación de atributos funcionales usando bucles a través de filas y columnas. Se debe evitar esta forma de programar porque hará el cálculo muy lento.

```
FUNCTIONMEDIA, mvcperiod, ResultArrayMedia, Img, UmbralNeg, UmbralValid, NofMVCPeiodsPerYear
IF mvcperiod EQ 1 THEN BEGIN
ResultArrayMedia[*,*,0] = ((Img GE UmbralNeg) and Img); carga el valor de la primera banda si no es negativo.
Si es < 0 pone 0.
ResultArrayMedia[*,*,1] = (Img GT UmbralValid); Sí cuenta los negativos (transf a 0) como válidos.
ENDIF ELSE BEGIN
ResultArrayMedia[*,*,0] = ResultArrayMedia[*,*,0] + ((Img GE UmbralNeg) and Img); -Suma de bandas
ResultArrayMedia[*,*,1] = ResultArrayMedia[*,*,1] + (Img GT UmbralValid); -Número de valores válidos.
considera los negativos como 0 para la media
EN ELSE
IF mvcperiod EQ NofMVCPeiodsPerYear THEN BEGIN
ResultArrayMedia[*,*,2] = ResultArrayMedia[*,*,0]/ResultArrayMedia[*,*,1]; -hace la Media (suma / nº de
valores válidos)
ToSave = [2]
```



```
RETURN,ResultArrayMedia[*,* ,ToSave]; Poner 1:2 para incluir la cuenta
ENDIF
```

Cuadro 5.5. Ejemplo de script en IDL de cómo calcular los atributos a nivel de toda la imagen sin bucles.

3. El mismo código empleado para calcular los atributos de la curva de año medio se usará para calcular los atributos de la curva de cada año. Siguiendo el ejemplo anterior, se calculará la media de las 23 imágenes que hay en un año. Simultáneamente a la media (para ahorrar tiempo de computación) se deberán construir funciones para calcular el resto de atributos funcionales: Máximo, Mínimo, Coeficiente de Variación, Momento del máximo y Momento del mínimo (Cuadro 5.6.).

```
FUNCTIONDMAX, mvcperiod, ResultArrayDMAX, Img, UmbralNeg, UmbralValid, NofMVCPPeriodsPerYear,
CambioNanParaDmax
ImgF = ((finite (Img, /NaN)) * (CambioNanParaDmax)) ; - da a los NaN e Inf el valor -9000 y al resto 0
IFmvcperiodEQ1THENBEGIN
ResultArrayDMAX[*,* ,0] = ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg) ;carga el valor de la primera banda si ES>-
5000. si es<=-5000 pone 0
ResultArrayDMAX[*,* ,1] = (ImgGTUmbralValid) ;-no cuenta los valores <-5000 (negativos) como validos
ResultArrayDMAX[*,* ,2] = (finite(Img)+finite(Img, /NaN)) ;-Banda auxiliar.Para contar cuantas bandas van
pasando
; Independientemente de si su valor es NAN o no lo es. Sirveparacalcular MMAX
ResultArrayDMAX[*,* ,3] = (((ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg))
EQResultArrayDMAX[*,* ,0])*(ResultArrayDMAX[*,* ,2])) $ ; This is necessary to account for MMAX=1,
+ (((ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg)) NEResultArrayDMAX[*,* ,0])*1);otherwise, when MMAX is
the first date, it prints 0 instead of 1.
ENDIFELSEBEGIN
ResultArrayDMAX[*,* ,0] = ((ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg)) * ((ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg))
GE (ResultArrayDMAX[*,* ,0]))) $;el orden de los factores tiene que ser este POR FUERZA,
+ (((ResultArrayDMAX[*,* ,0]) GT (ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg)))) *
(ResultArrayDMAX[*,* ,0]);MAXIMO ;si no, no lo hace bien (inexplicablemente después de 3 días dando vueltas)
ResultArrayDMAX[*,* ,1] = ResultArrayDMAX[*,* ,1] + (ImgGTUmbralValid) ;-Número de valores válidos
ResultArrayDMAX[*,* ,2] = ResultArrayDMAX[*,* ,2] + (finite(Img)+finite(Img, /NaN)); va sumando cuantas
bandas ha contado OJO, LA PRIMERA NO LA SUMA, MIRAR ABAJO
; Independientemente de si su valor es NAN o no lo es. Sirve para calcular MMAX
ResultArrayDMAX[*,* ,3] = (((ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg))
EQResultArrayDMAX[*,* ,0])*(ResultArrayDMAX[*,* ,2])) $
+ (((ImgF + ((ImgGTUmbralNeg) andImg))
NEResultArrayDMAX[*,* ,0])*(ResultArrayDMAX[*,* ,3]));momento (banda) del máximo
ENELSE
IFmvcperiodEQNofMVCPPeriodsPerYearTHENBEGIN
ToSave = [3]; vector que indica las bandas que queremos
RETURN,ResultArrayDMAX[*,* ,ToSave]; CAMBIAR LA BANDA QUE QUEREMOS
ENDIF
END
```

Cuadro 5.6. Ejemplo de script en IDL de cómo calcular el momento del máximo.

4 y 5. Empleando el mismo código de los pasos 1 y 2, se obtendrá la media interanual de los atributos funcionales y su variabilidad interanual, incluyendo coeficiente de variación interanual, máximo y mínimo históricos.

5.4 Estimación de tendencias

Este módulo permitirá detectar cambios sutiles de largo plazo que afectan a diferentes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas. Los resultados de las tendencias deben ser matizados por la consistencia de las mismas, información que es aportada por el nivel de significación, y que se incluye también en el sistema, pudiendo personalizarse el nivel de significación con el que mostrar los resultados. Las tendencias positivas serán aquellas en la que se registre un aumento positivo del valor del índice/atributo, mientras que las negativas se referirán a una disminución.

Se calcularán las tendencias temporales de cada una de las variables de interés (i.e. de cada compuesto de NDVI o EVI y de los 6 atributos funcionales de la curva anual) para el período de 2000 hasta la

actualidad. Se utilizará el test de tendencias de Mann-Kendall, un análisis basado en un test no paramétrico robusto frente a valores faltantes y extremos, la no normalidad y heterocedasticidad de los datos, y la autocorrelación temporal (Hirsch & Slack, 1984; Van Belle & Hughes, 1984). Este test analiza la existencia de una tendencia monotonía temporal del atributo basada en el estadístico de tau de Kendall, sumando el número de veces que cada año tuvo un valor superior o inferior a cualquier anterior. El nivel alfa para el test se establece en 0.05. Por defecto, se ofrecerán los resultados significativos con un p-valor<0.05, pero esto podrá personalizarse.

Para cada una de las variables de las que se quiera calcular las tendencias, habrá que personalizar el código en R que se muestra a continuación (Cuadro 5.7.).

```
#####
##1) LEER Y ANALIZAR SERIE TEMPORAL DE LA VARIABLE DE INTERÉS (E.G. EVI) #####
#####
install.packages("caTools",dep=T)
install.packages("magic",dep=T)
install.packages("zyp",dep=T)

library(caTools)
library(raster)
library(magic)
library(wq)
library(zyp)
library(Kendall)

setwd('C:\\ AnalisisTendencias\\EVI')

# Funcion para leer todos los archivos imagen en el directorio de trabajo
ListaArchivos<- list.files(pattern='.img$')
ListaArchivos
ListaHeaders<- list.files(pattern='.hdr$')
64
ListaHeaders

####
## Leer las imágenes (estos comandos son para archivos .img de ENVI)
ImagenEVI = read.ENVI(ListaArchivos[1], headerfile=ListaHeaders[1])
str(ImagenEVI)
## Dibujar la imagen de EVI de la Peninsula
image(ImagenEVI[,1])
## Rotar la imagen
PIRotada<- arot(ImagenEVI,rights=3)
str(PIRotada)
## Dibujar la imagen de EVI de la Peninsula (rotada)
image(PIRotada[,1], col=rainbow(100))
## Poner un titulo
mtext("Raw Matrix ENVI Image for EVI", side=3,line = 2, font=3, cex=1.25)

#####
## 2) EVALUAR LA EXISTENCIA DE TENDENCIAS EN ESE SUBSET MEDIANTE KENDALL ##
#####
## Evaluar la existencia de tendencias con SeasonalMannKendall
nrows<- nrow(PIRotada)
ncols<- ncol(PIRotada)

KTauImg<- array(dim=c(nrows,ncols))
PValueImg<- array(dim=c(nrows,ncols))
KTauImgSig<- array(0,dim=c(nrows,ncols))
for(i in 1:nrows) {
  for(j in 1:ncols) {
    # for(i in 100:100) {
    # for(j in 100:100) {
    EVIts<-ts(PIRotada[i,j],start=c(2001,1),frequency=12)
    #plot(decompose(EVIts))
    SMKOutput<-SeasonalMannKendall(EVIts)
    KTauImg[i,j] <- SMKOutput$tau[1]
    PValueImg[i,j]<- SMKOutput$sl[1]
  }
}
KTauImgSig<-KTauImg
```

```
KTaulmgSig[which(PValueImg>0.05,arr.ind = F)] <- 0
```

```
par(mfcol=c(1,1))
#par(mfcol=c(2,2))
image(KTaulmg[,])
image(PValueImg)
image(KTaulmgSig,col=topo.colors(10))
```

```
#par(mfcol=c(4,1))
EVIts<-ts(PIRotada[100,100,],start=c(2001,1),frequency=12)
plot.ts(EVIts)
plot(decompose(EVIts))
SeasonalMannKendall(EVIts)
```

Cuadro 5.7. Ejemplo de script en R para calcular las tendencias.

Además, pueden emplearse otros paquetes, en particular *zyp* y *wq* que presentan funciones muy amigables para el test de tendencias de Mann-Kendall y la pendiente de Sen:

- *zyp* (Sen, Zhang + Yue-Pilon *trends package*)
(<http://cran.r-project.org/web/packages/zyp/zyp.pdf>)
- *wq* (*WaterQuality*)
(<http://cran.r-project.org/web/packages/wq/wq.pdf>)
- *mblm* (*Median-Based Linear Models*)
(<http://cran.r-project.org/web/packages/mblm/mblm.pdf>)
- *Kendall* (*Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test*)
(<http://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/Kendall.pdf>)

5.5 Detección de anomalías temporales y alertas tempranas

5.5.1 Detección de anomalías temporales

Con el término anomalía nos referimos a un patrón en los datos que muestra un comportamiento diferente del esperado, que puede ser entendido como: 1) un fenómeno o hecho observado que se desvía en exceso de la variación que habitualmente muestra, o 2) algo inconsistente con lo que de manera natural se esperaría.

A través de la evaluación de la diferencia entre el EVI/NDVI de un momento de un año determinado (i.e. una fecha concreta, mes, una estación, o incluso un año entero) y el promedio histórico de EVI/NDVI para el mismo momento en toda la serie histórica, se podrán detectar anomalías temporales (Figura 3.4.). Estas anomalías podrán variar en su significación, según que los valores que muestren estén muy alejados o no de la media histórica. Hemos previsto que para permitir al usuario saber si la anomalía temporal es extrema, es decir, está alejada significativamente de la media histórica, el mapa se acompañará un selector interactivo de p-valor para mostrar todas las anomalías (e.g., $p\text{-value} \leq 1$) o sólo aquellas que están significativamente alejadas de la media (e.g., $p\text{-value} \leq 0.001$). Se deberían ofertar los p-values a partir de métodos paramétricos y no-paramétricos para obtener los intervalos de confianza. Para refinar la selección de p-value pueden usarse barras con límites superior e inferior al estilo de las usadas en los buscadores de vuelos como en el ejemplo de www.tripadvisor.es que se acompaña al mapa. Esta barra también debería ofrecer la posibilidad de seleccionar interactivamente el comienzo y fin del periodo que se quiere comparar.

Para la realización de esta acción se propone como solución más robusta crear rutinas con el lenguaje de programación R.

5.5.2 Detección de alertas tempranas

La disponibilidad de imágenes MODIS cada 16 días (resolución temporal de las imágenes) permite además evaluar el estado del ecosistema casi en tiempo real, tomando como referencia su comportamiento en años anteriores, o el comportamiento anual que ha presentado con respecto a cada atributo funcional. En relación con este comportamiento de referencia, se considerará un alerta (o anomalías temporal) cuando el nuevo valor del índice o atributo se aleje de sus valores de referencia (o variabilidad natural) (Figura 5.2.). De este modo, se puede evaluar de forma rápida y continua el “estado de salud” de un ecosistema en relación a su comportamiento histórico medio.

Para la realización de esta acción se propone como solución más robusta crear rutinas con el lenguaje de programación R.

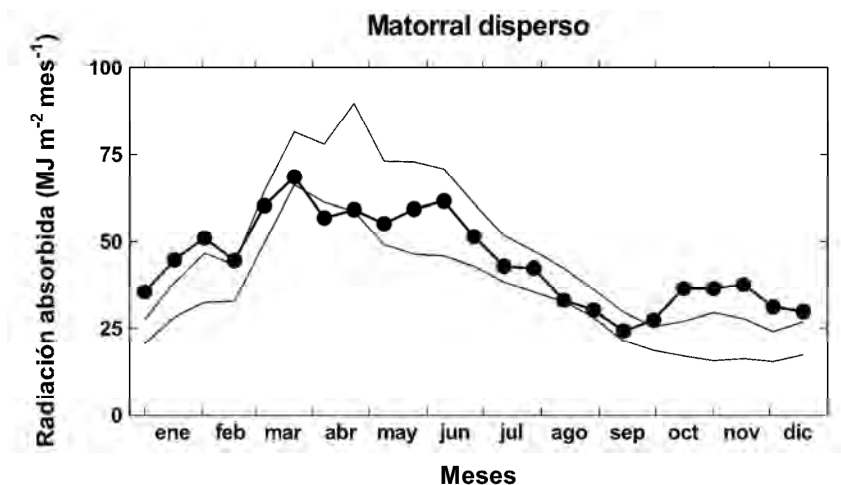


Figura 5.2. Ejemplo de salida gráfica para el Sistema de Alerta Temprana. Las líneas continuas delgadas indican rango promedio más/menos una desviación estándar (en este caso 2001-2007), y la línea gruesa con puntos muestra la dinámica del año más reciente (2008). Un dato cada 16 días. Tomado de (Oyonarte et al., 2010).

5.5.3 Evaluación de la relevancia de las alertas tempranas

Se propone evaluar la relevancia de la alerta adoptando el método que usa el sistema experimental para la evaluación de las áreas protegidas de África del *Joint Research Centre* (JRC) (<http://bioval.jrc.ec.europa.eu/APAAT/>). Este método estima tres atributos de las anomalías registradas: fortaleza, desviación y duración. La fortaleza representa cómo de diferentes son los valores de lo esperado; a mayor diferencia mayor fortaleza. La desviación trata de determinar si la alerta puede ser simplemente un evento temprano o tardío tal como un comienzo temprano de la estación lluviosa o un comienzo tardío de la estación de fuego.

La duración mide el tiempo durante el cual la alerta ha sido observada, y podría estimarse a partir del número de fechas previas para las que el valor alcanzado en un atributo funcional ha sido inferior (o superior) a la media más un desvío estándar. Los valores de cada uno de estos tres atributos son categorizados de acuerdo con su rango de importancia en y codificados en colores: bajo (1, amarillo), medio (2, naranja) y alto (3, rojo) y son dispuestos para cada fecha (que deberá ser coincidente con la fecha del último compuesto MODIS incorporado al análisis) en una tabla en la que cada fila corresponde a la alerta que se produce en un parque concreto, y para un indicador (variable) de seguimiento concreto (Figura 5.3.).

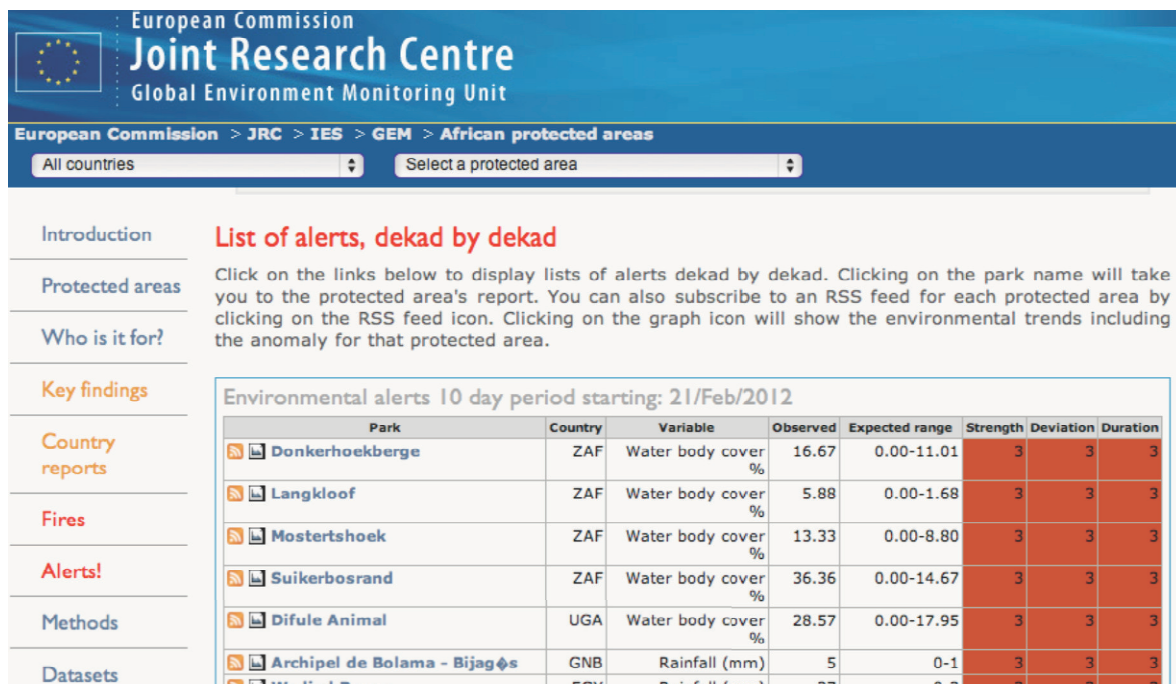


Figura 5.3. Visualización de alertas en el sistema experimental para la evaluación de las áreas protegidas de África del Joint Research Centre (JRC) (<http://bioval.jrc.ec.europa.eu/APAAT/>).

Una forma que tiene de mantener actualizados a los usuarios de la web del JRC, es a través de un sistema RSS, lo que puede ser muy útil para los gestores de cada Parque. Además, el almacenamiento de las alertas, tal y como lo hace también el JRC, permitirá el análisis de las mismas lo que ayudará a la identificación de problemas concretos en los diferentes parques.

Si se desea, la priorización de las alertas se puede refinar considerando el valor de conservación y de vulnerabilidad de los ecosistemas afectados, en cuyo caso, la construcción de la alerta se basaría en una consulta a la base de datos.

Para la realización de esta acción se propone como solución más robusta crear rutinas con el lenguaje de programación R.

5.6 Reproyección y mosaico

5.6.1 Reproyección

Las imágenes originales MODIS se pueden reproyectar mediante la aplicación gratuita MRT (MODIS Reprojection Tool). Pero debido al post-procesado llevado a cabo y a que esta aplicación solo acepta el formato original de MODIS (.hdf EOS) las imágenes resultantes en este sistema de seguimiento no pueden abrirse en MRT.

La reproyección de los datos espaciales obtenidos deberá hacerse mediante el SIG GRASS. Este SIG usa *Locations*, es decir, directorios en los que toda la información contenida está en el mismo sistema de coordenadas. Por lo tanto, se deberán importar los datos desde un directorio *location* con la proyección antigua a un *location* de destino con la proyección deseada usando los siguientes módulos:

- 1) Para datos Ráster: `módulo.r.proj`. Permite la reproyección de rasters de forma sencilla indicando en qué *location* se encuentra la imagen a reproyectar, así como su nombre de entrada y de salida. Además es posible elegir el método de interpolación (proximidad, bilineal o cúbica). Para imágenes grandes (>2gb.) `r.proj` puede no funcionar bien, por lo que se recomienda exportar como `geotif` y usar el módulo `gdalwarp`.

- 2) Para datos vectoriales: módulo v.proj. Funciona igual que r.proj, indicando nombres y rutas de entrada y salida.

5.6.2 Mosaico

Para formar una imagen conjunta a partir de otras de menor tamaño, GRASS posee una serie de módulos de mosaico. El módulo r.patch realiza el mosaico a partir de rasters que previamente estén georeferenciados. Como paso previo al mosaico, se debe usar el módulo g.region para indicar cuales serán los límites de la imagen en mosaico (Cuadro 5.8.).

```
g.regionrast=imagen1,imagen2,imagen3,imagen4 ### lista imágenes para indicar los límites
r.patchin=imagen1,imagen2, imagen3, imagen4 out=nombre_salida### genera el mosaico
```

Cuadro 5.8. Ejemplo de script en R para definir los límites de la imagen en mosaico.

5.7 Extracción de la información de la imagen y construcción de una base de datos

5.7.1 Extracción de información de la imagen

Una vez realizado el procesamiento de las imágenes para calcular los distintos atributos funcionales, tendencias, anomalías temporales, etc., será necesario extraer toda esta información para cada uno de los píxeles de los parques nacionales. Incluso, nos interesará extraer la serie completa de índices de vegetación e información de calidad del producto MOD13Q1.

Para ilustrarlo de forma sencilla, supongamos que tenemos ya calculada la imagen de la media anual de EVI para el año medio y queremos extraer esta información para todos los píxeles de un determinado ecosistema dentro de un parque.

Para ello, se usará el lenguaje de programación R que permite realizar este proceso de una forma rápida y sencilla. Como paso previo al proceso, es necesario tener los píxeles de interés en formato vector de puntos, la imagen con los IV (ráster) en formato ASCII grid, estando ambos en la misma proyección espacial y tener instalados los paquetes de R mapproj y sp (Cuadro 5.9.).

```
library(mapproj)# carga automáticamente el paquete "sp" también
raster<- readAsciiGrid("Ruta_del_raster")
puntos<- readShapePoints("Ruta_de_los_puntos")
overlay(raster, puntos)
```

Cuadro 5.9. Ejemplo de script en R para extraer información de una imagen.

El resultado es una columna añadida a los atributos de los puntos con los valores del ráster (IV) cuyo nombre es igual al de dicha imagen.

Otra forma sencilla de hacerlo, pero no recomendada puesto que hay que cambiar de programa en el flujo de trabajo y esto ralentiza el proceso, es mediante el software GRASS, que incluye una serie de módulos con esta finalidad. Como paso previo al proceso, es necesario tener identificados los píxeles de interés que deseamos extraer en formato vector de puntos. Son necesarias únicamente 2 líneas de código. La primera crea una nueva columna en los atributos de los puntos, la segunda añade la información del ráster (imagen de EVI medio) a esta columna creada (Cuadro 5.10.).

```
v.db.addcolmap=NombreVectorcolumns="NombreCeldadobleprecision"
v.what.rastvector=NombreVectorraster=NombreRastercolumn=NombreCol
```

Cuadro 5.10.

El tipo de datos de la columna (en el ejemplo *double precisión*) puede variarse según lo deseado a enteros (int), a un string de longitud 10 (varchar(10)), etc. Este ejemplo extrae la información de un solo ráster, pero usando el comando *for* se puede generar un proceso iterativo que añade en cada ciclo una columna nueva para rellenar con información de un nuevo ráster.

Se recomienda realizar este proceso usando R de forma programática pero, para comprobar los resultados, se puede hacer usando la interfaz gráfica de GRASS: abrir el *Layer Manager* para añadir manualmente una nueva columna a la capa de puntos, indicando nombre y tipo dentro de la pestaña *ManageTable* y después abriendo el menú *Vector*→*Updatepointattributesfromraster*→*Samplerastermaps at pointlocation*.

El resultado será el vector que se introdujo, pero con una serie de columnas nuevas con la información de los IV extraída de las imágenes.

Con vistas a conseguir la automatización en el proceso de seguimiento, se recomienda la opción de extracción de información mediante el lenguaje R. Diversos subsistemas de este programa de seguimiento se basan en el uso de R, por lo que esta tarea de extracción es fácil de integrar con el resto de scripts, dando lugar a un flujo de trabajo más homogéneo, rápido y sencillo.

La ejecución de este paso se puede controlar mediante el gestor de flujos de trabajo de Kepler. Una vez finalizada la extracción, se deberá exportar la tabla de atributos del vector de puntos a un fichero tipo texto que será directamente accesible desde la base de datos global.

5.7.2 Integración de la información en una base de datos (PostgreSQL)

Para crear la base de datos que integra la información procedente del procesamiento de las imágenes y la referenciación ecológica y geográfica de los píxeles se propone usar PostgreSQL (<http://www.postgresql.org/>) una base de datos libre y abierta (FOSS). Esta base de datos está disponible para Windows, Linux y MacOSX y tiene varios interfaces gráficos disponibles y una potente consola. Además, cuenta con una extensión que le capacita para trabajar con datos geográficos (PostGIS).

Primero hay que crear la base de datos en PostgreSQL. Para eso se dispone primero del interfaz gráfico y luego la consola SQL. Posteriormente se importan los datos procedentes de archivos de texto a la base creada.

Una vez creados todos los campos, procedemos a asignar la clave primaria a la tabla. Primero se da un nombre, que coincide con el del campo de la tabla. Luego le asignamos la columna a la clave creada. Por último realizaremos las consultas en SQL.

5.8 Detección de anomalías espaciales

En este módulo solo se estimarán las anomalías espaciales, entendiendo éstas como aquellas localizaciones (anomalías espaciales) en las que un ecosistema o hábitat, muestra un comportamiento fuera de las medidas centrales (media \pm desviación estándar) del atributo funcional que se esté estudiando (Figura 5.5).

Se utilizan varias técnicas de extracción de datos y algoritmos para la detección de anomalías. En nuestro caso proponemos una medida sencilla. Las anomalías serán aquellos valores situados en la región de la distribución fuera de aquella definida por el 68% de los datos alrededor de la media (Figura 5.4).

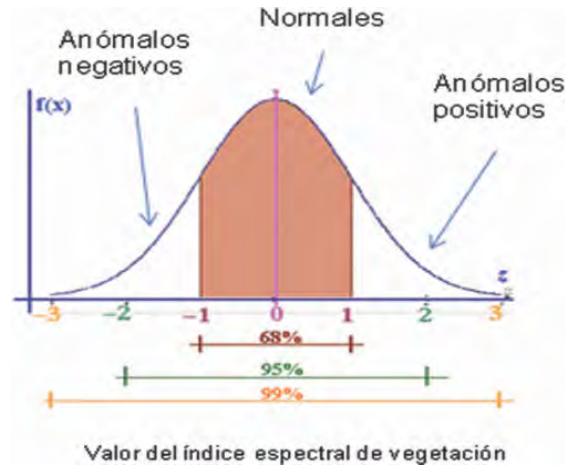


Figura 5.4. Las anomalías espaciales son estimadas como aquellos valores situados en la región de la distribución fuera de aquella definida por el 68% de los datos alrededor de la media.

Para identificar las anomalías será, por tanto, necesario identificar en primer lugar las regiones y comportamientos normales representativos del ámbito que se esté estudiando (Ecosistemas). Para ello se deberá analizar la información de cada píxel comparándola con los de su entorno o clase. Se propone el uso de la lenguaje de programación R. Primero es necesaria la clasificación previa de la imagen, analizándose la variabilidad del indicador para cada clase considerada. En un primer paso se establece un intervalo característico de variabilidad y posteriormente, utilizando como referencia los valores extremos del intervalo, se localizan aquellos píxeles que tienen un comportamiento anómalo respecto a su clase.

Puesto que las anomalías espaciales se podrán calcular a nivel de Parque o ecosistema, su generación se producirá como resultado a una consulta de la base de datos.

A)

APLICACIONES DE MONPARK AL SEGUIMIENTO DEL P.N. SIERRA NEVADA

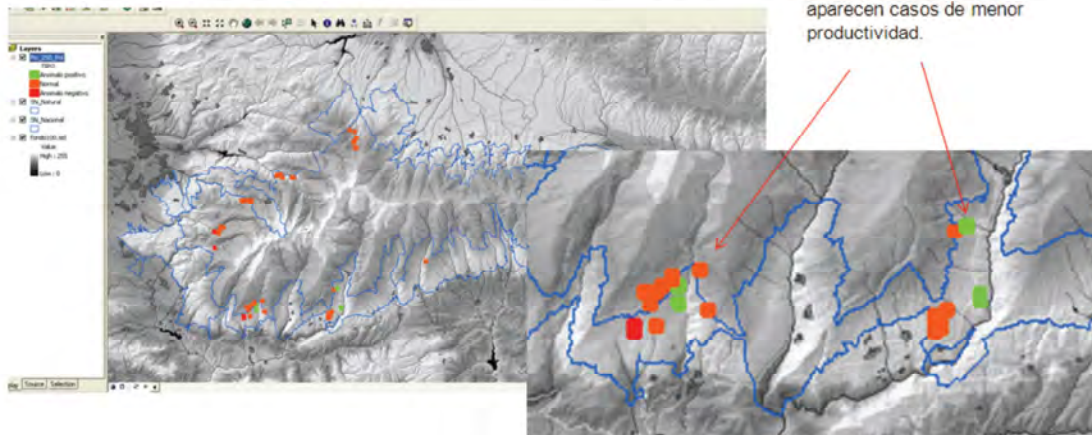
Anomalías espaciales

Entrada de datos

Tipo de vegetación: Robledal Lista vegetación: Porcentaje vegetación: 90 y 100
 Litología: Lista litología: Porcentaje litología: 90 y 100
 Pao bioclimático: Lista pao bioclimático: Nombre vegetación: Enebral
 P-valor: 0,1

Cód. Bos.	DESCRIPCIÓN	Por/Veg	DESCRUCO	Porcentaje	PBO_BOC	Media	Supremo	Infimo	Tipo	
105_426	Robledal	94_36296704	Microsquirites	99	999942432	Supramediterránea	-0,0801	0,321952066	0,160057034	Anomalia negativa
106_428	Robledal	92_40297217	Microsquirites	99	999942432	Supramediterránea	-0,0801	0,321952066	0,160057034	Anomalia negativa
108_438	Robledal	99_99942428	Microsquirites	99	999942431	Supramediterránea	0,164920966	0,321952066	0,160057034	Normal
109_436	Robledal	99_71876268	Microsquirites	99	999942429	Supramediterránea	0,171010901	0,321952066	0,160057034	Normal
109_436	Robledal	99_94012286	Microsquirites	99	999942430	Supramediterránea	0,190770267	0,321952066	0,160057034	Normal
109_436	Robledal	97_99939135	Microsquirites	99	999942433	Supramediterránea	0,173602193	0,321952066	0,160057034	Normal
111_435	Robledal	92_99941687	Microsquirites	99	999942433	Supramediterránea	0,206872039	0,321952066	0,160057034	Normal
121_472	Robledal	96_41029495	Microsquirites y suabrosquirites	99	999942430	Supramediterránea	0,0801	0,321952066	0,160057034	Anomalia negativa
121_472	Robledal	96_02336484	Microsquirites y suabrosquirites	99	999942429	Supramediterránea	0,0801	0,321952066	0,160057034	Anomalia negativa
131_386	Robledal	99_94067749	Microsquirites	99	999942430	Supramediterránea	0,242820146	0,321952066	0,160057034	Normal
134_466	Robledal	95_07395816	Microsquirites y suabrosquirites	99	999942429	Supramediterránea	0,268995976	0,321952066	0,160057034	Normal
134_389	Robledal	97_47048608	Microsquirites	99	999942431	Supramediterránea	0,223708192	0,321952066	0,160057034	Normal
134_417	Robledal	94_99999114	Microsquirites	99	999942431	Supramediterránea	0,164920966	0,321952066	0,160057034	Normal

Algunos robledales de la ladera S son más productivos que los demás, aunque también aparecen casos de menor productividad.



B)

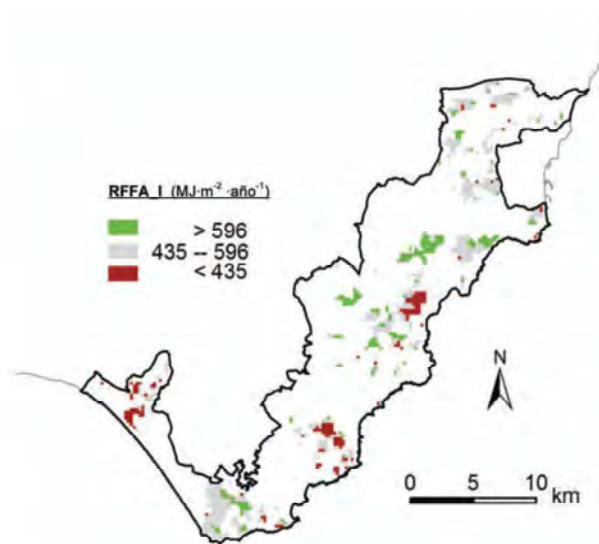


Figura 5.5. Ejemplos de detección de anomalías espaciales en el funcionamiento de los ecosistemas. A) Salida de la plataforma Monpark identificando las anomalías en los valores de NDVI en el ecosistema de robledal del Parque Nacional de Sierra Nevada; B) Anomalías espaciales en los valores de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa. En ambos casos el intervalo definido para establecer las condiciones de referencia viene dado por la media +/- una desviación estándar de la muestra seleccionada.

6 Gestión del flujo de trabajo

Mediante el diseño de componentes analíticos que pueden ser ejecutadas en los sistemas de flujo de trabajo científico, los científicos mejoran de manera significativa la documentación de sus procesos, la complejidad de los modelos y permiten que los modelos se ejecuten en potentes sistemas de computación distribuida (Figura 6.1).

Web Services Workflow

Author: Ilkay Altintas, SDSC

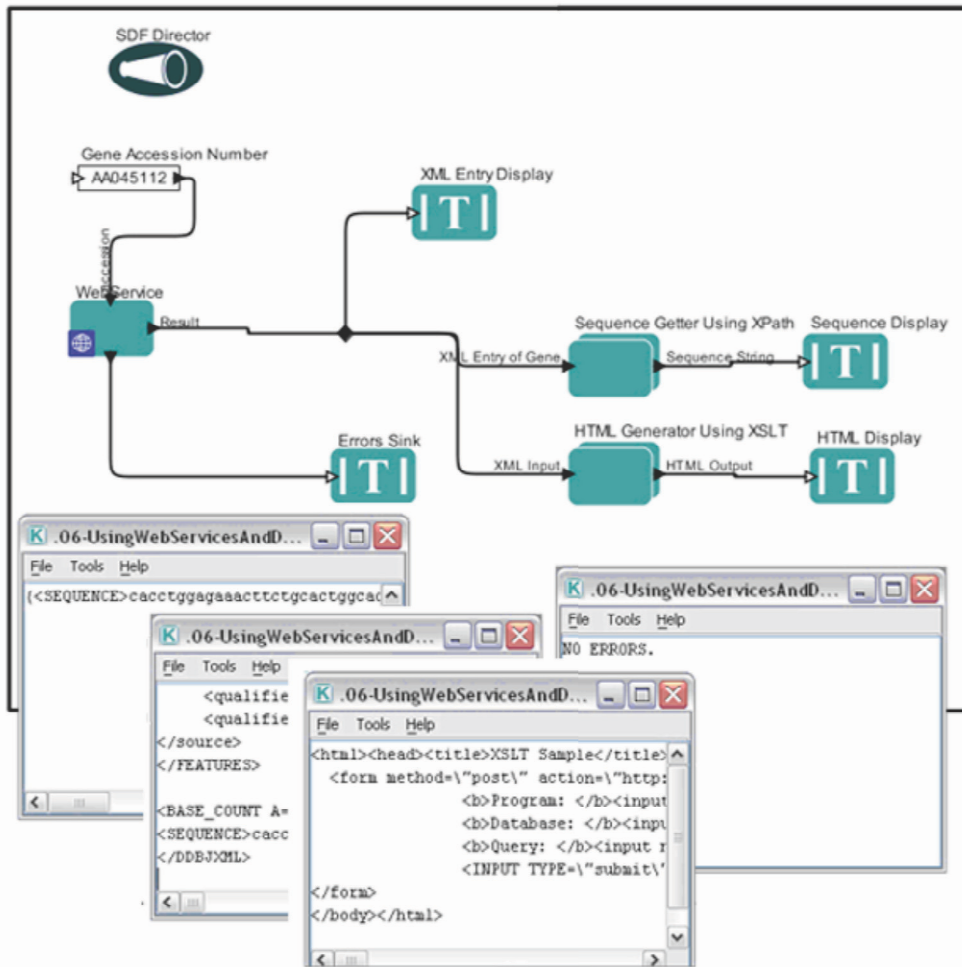


Figura 6.1. Ejemplo de un flujo de trabajo científico empleado en una aplicación web para la generación de secuencia de genes (<https://kepler-project.org/users/sample-workflows>)

En la actualidad hay varios ejemplos de flujos de trabajo científicos basados en la composición dinámica, como myGrid, Triana, Kepler, lo que permite a los equipos de científicos distribuidos geográficamente trabajen juntos en la captura, correlación, análisis e intercambio de datos. Sin embargo, consideramos que la aplicación más recomendable para la automatización y gestión de flujo de trabajo es Kepler (<https://kepler-project.org/>). La versión actual de este sistema hace uso de modelos sofisticados capaces de representar y operar con tipos de datos heterogéneos, además puede invocar los servicios web y de red.

Se trata de un sistema de código abierto que tiene como objetivo servir a múltiples dominios de conocimiento, entre los que destacan la Ecología, la Geología, la Física, la Química y la Bioinformática. Su objetivo es desarrollar soluciones genéricas tanto para el procesamiento de flujos de trabajo científico como para los desafíos de la integración de aplicaciones científicas (Ludäscher et al., 2006).

Kepler incluye una interfaz gráfica en la que cabe resaltar el concepto de clases de los componentes (actores) y los modelos de computación (directores). Los primeros promueven un alto grado de independencia, ya que desvinculan la semántica de la aplicación de flujo de trabajo de las clases, mientras que los otros son responsables de la ejecución y la gestión del ciclo de vida del flujo de trabajo en un determinado modelo de computación.

Por ejemplo, incluye componentes específicos para acceder a los datos descritos en el lenguaje de metadatos ecológicos (EML), tiene componentes especiales para el acceso a la incorporación a las redes de sensores ecológicos, y permite a los científicos a incorporar herramientas de análisis de uso común, tales como R y Matlab.

Kepler (al igual que otros sistemas de flujo de trabajo) también obtiene información sobre la procedencia de los análisis científicos. Cada flujo de trabajo representa un registro preciso de los procesos utilizados en el análisis, y de la procedencia de los productos derivados de ellos, lo que permite a otros a comprender plenamente la relación entre los datos, el procesamiento y los resultados, mejorando significativamente la replicabilidad de los resultados científicos. Las nociones básicas de su funcionamiento se pueden consultar en Bonet et al. (<http://es.scribd.com/doc/21686164/KEPLER>) y Benito (2009) (<http://es.scribd.com/doc/68182600/PRESENTACION-KEPLER>).

7 Integración en visor cartográfico y plataforma de seguimiento

La plataforma web de seguimiento deberá contar con un formulario (cuya implantación dependerá del nivel de desarrollo de la herramienta) y un sistema de visor de mapas asociado. Este visor deberá estar basado en una arquitectura cliente-servidor, que usa estándares OGC, con capacidad para servir información espacial en formato ráster o vectorial y sin necesidad de descargar ninguna aplicación al equipo del usuario, es decir, a través de un servicio *Web Map Service* (WMS). Este tipo de servicio viene definido por el OGC (*Open Geospatial Consortium*) y constituye una forma de producir mapas de datos referenciados espacialmente, de forma dinámica a partir de información geográfica. Para un servicio WMS un "mapa" es una representación de la información geográfica en forma de un archivo de imagen digital conveniente para la exhibición en una pantalla de ordenador. De esta forma, un mapa no consiste en los propios datos, sino que los mapas producidos por WMS se generan normalmente en un formato de imagen como PNG, GIF o JPEG, y opcionalmente como gráficos vectoriales en formato SVG (*Scalable Vector Graphics*) o WebCGM (*Web Computer Graphics Metafile*). Para la puesta en marcha de este servicio será necesario etiquetar los datos que se produzcan con los metadatos correspondientes.

Para montar el visor cartográfico se deberá combinar el uso de un servidor web Apache, una aplicación que permita la implementación de WMS como es Mapserver (<http://mapserver.org/index.html>) y una aplicación donde el usuario visualice la información y pueda interactuar como Pmapper (<http://www.pmapper.net/>) a través de un navegador web como Google Chrome o Mozilla Firefox. Las operaciones WMS también pueden ser invocadas usando clientes avanzados SIG, realizando igualmente peticiones en la forma de URLs. Existe software libre, como las aplicaciones GRASS, uDIG, gvSIG, Kosmo y otros, que permite este acceso avanzado a la información remota, añadiendo la ventaja de poder cruzarla con información local y disponer de una gran variedad de herramientas SIG.

Como paso previo, toda la información susceptible de ser usada en el visor debe estar preparada tal y como se desea visualizar. Además, las aplicaciones usadas para el montaje del visor requieren la personalización de unos pocos archivos de configuración. El número de archivos modificables es mayor, pero aquí se indican los esenciales y básicos para el correcto funcionamiento del visor.

- 1) En Mapserver: hay que modificar el llamado Mapfile (.map file) (Cuadro 7.1.). En este fichero se declaran las relaciones entre objetos, señala donde se localizan los datos, define como tiene que ser dibujada la información (que capas se representan con símbolos, cómo se representa la escala gráfica, qué capas se dividen en clases para su representación, etc.). El Mapfile es leído por Mapserver en cada interacción del usuario con la aplicación para dar respuesta a sus peticiones. Presenta dos partes bien diferenciadas, primero una parte donde se dan los parámetros generales del mapa como la extensión, la proyección o los formatos de imagen y una segunda con la definición de las capas de información (*layers*).

```
MAP
  NAME "sample"
  STATUS ON
  SIZE 600 400
  SYMBOLSET "../etc/symbols.txt"
  EXTENT -180 -90 180 90
  UNITS DD
  SHAPEPATH "../data"
  IMAGECOLOR 255 255 255
  FONTSET "../etc/fonts.txt"
  #
  # Start of web interface definition
  #
  WEB
  IMAGEPATH "/ms4w/tmp/ms_tmp/"
  IMAGEURL "/ms_tmp/"
  END # WEB
  #
  # Start of layer definitions
  #
  LAYER
  NAME 'global-raster'
  TYPE RASTER
```

```
STATUS DEFAULT
DATA blue Marble.gif
END # LAYER
END # MAP
```

Cuadro 7.1. Ejemplo de fichero Mapfile de Mapserver.

- 2) En Pmapper: es necesario modificar los siguientes archivos orientados a la funcionalidad y aspecto final:
 - a. *Config.ini*: define la ubicación del mapfile, se elige el idioma, se establecen las capas visibles por defecto o aquellas a las que se aplica la auto identificación, etc.
 - b. *PHP_config.php*: define los grupos funcionales y las capas que los forman, se activan o desactivan herramientas de navegación y herramientas adicionales, etc.
 - c. *Search.xml*: define los campos de la base de datos para realizar las búsquedas o consultas (Figura 7.1)

Ambas aplicaciones poseen manuales y guías online muy útiles y recomendadas para ayudar en la modificación de estos ficheros:

Mapserver: <http://mapserver.org/MapServer.pdf>.

Pmapper: <http://svn.pmapper.net/trac/wiki/DocManual>.



Figura 7.1. Ejemplo de visor cartográfico generado mediante Mapserver y Pmapper (fuente: <http://dugi-doc.udg.edu/bitstream/10256/3387/2/p14.pdf>).

Como base cartográfica para cualquiera de estas aplicaciones se podrán usar los productos de Google Maps.

Existen otras opciones viables y abiertas para la publicación de datos espaciales, tales como la suite OpenGeo (<http://opengeo.org/>) que incluye varias aplicaciones que abarcan todo el proceso, desde la generación de base de datos hasta el visor web. Resulta muy completa pero presenta el inconveniente de ser de pago. Por otro lado, la aplicación web GeoCommons (<http://geocommons.com/>) supone una opción menos técnica y más visual, que permite la publicación de mapas y su visualización. Finalmente, un proyecto muy interesante desarrollado por Vizzuality (<http://vizzuality.com/company>), una empresa madrileña que está adquiriendo gran experiencia a nivel internacional en la visualización y análisis de datos de biodiversidad y conservación en internet, es cartoDB (<http://cartodb.com/>) una base de datos Geospacial en la nube. CartoDB es un proyecto *Open Source* cuya finalidad es facilitar la creación de aplicaciones geolocalizadas y la creación de mapas.

8 Operatividad y requerimientos técnicos y económicos del sistema de seguimiento y alerta

8.1 Necesidades de software, hardware y almacenamiento en el OAPN

8.1.1 Software

LIBRE

QUANTUM GIS

Quantum GIS (QGIS) es un sistema de Información Geográfica (SIG) de *Open Source* de fácil uso bajo la Licencia Pública General de GNU que proporciona visualización de datos, edición y capacidades de análisis. QGIS es un proyecto oficial de Fundación Geoespacial de *Open Source* (OSGeo). Se ejecuta en Linux, Unix, Mac OSX y Windows y es compatible con numerosos formatos vectoriales, ráster y formatos de bases de datos y funcionalidades.

QGIS experimenta un continuo crecimiento de sus capacidades, proporcionadas por las funciones básicas y los complementos. Permite visualizar, administrar, editar, analizar y componer mapas para imprimir.

GRASS

GRASS (acrónimo inglés de *Geographic Resources Analysis Support System*) es un software SIG (Sistema de Información Geográfica) bajo licencia GPL (software libre). Puede soportar información tanto ráster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes. GRASS está disponible principalmente para plataformas UNI* (GNU/Linux), aunque existe un proyecto paralelo denominado winGRASS GIS que ha portado el programa a versiones basadas en la tecnología NT del Sistema Operativo Microsoft Windows (Windows NT, Windows 2000, Windows XP, etc.) usando las librerías Cygwin. Todo ello con un código idéntico al de la versión UNIX y GNU/Linux (<http://www.um.es/geograf/sigmur/yerba/intro.html>).

GRASS GIS es, a día de hoy, el decano en el mundo del software libre geoespacial y pasa por ser uno de los programas libres más potentes y versátiles. Sus altas prestaciones y sus capacidades analíticas tanto en el trabajo con datos vectoriales como en el trabajo con datos ráster, hacen de GRASS una excelente herramienta para desempeñar trabajos de análisis espacial o geográfico en muchos campos de aplicación, desde el análisis ambiental hasta el análisis de redes, pasando por la teledetección o la simulación de modelos.

GRASS, en combinación con QGIS, se convierte en un binomio de altas prestaciones y largo recorrido pues, mientras GRASS tiene su rendimiento máximo en el trabajo con datos ráster, álgebra de mapas, etc. QGIS se integra con GRASS a través de un *plugin* ofreciendo muchas funcionalidades y posibilidades en el trabajo con datos vectoriales, desde la captura y edición de datos, hasta la aplicación de geoprosesos.

KEPLER

Kepler es un software libre para el diseño, ejecución, reutilización, evolución, archivar y compartir flujos de trabajo científico. Instalaciones de Kepler proporcionan un proceso y el seguimiento de datos, información sobre la procedencia y soluciones de alta velocidad de movimientos de datos.

En general los flujos de trabajo y en particular los flujos de trabajo científico, se dirigen a los gráficos donde los nodos representan componentes computacionales discretos y los bordes representan caminos por los que los datos y los resultados pueden fluir entre los componentes.

En Kepler, los nodos son llamados “Actores” y los bordes se les llama “Canales”. Kepler incluye una interfaz gráfica de usuario para los flujos de trabajo que integran un entorno de escritorio, un motor de tiempo para la ejecución de flujos de trabajo dentro de la interfaz gráfica de usuario (GUI) e independiente de una línea de comandos y una opción de computación distribuida que permite que las tareas de flujo de trabajo sean distribuidas entre los nodos de cálculo en un *cluster* de ordenadores o *grid computing*.

El sistema de Kepler, está dirigido a la utilización de una metáfora del flujo de trabajo para la organización de tareas computacionales que se dirigen hacia el análisis científico y en particular los objetivos de modelado. Por lo tanto, los flujos de trabajo científicos de Kepler en general modelan el flujo de datos desde un paso a otro en una serie de cálculos que permitan alcanzar una serie de cálculos que permitan alcanzar una meta científica.

Un flujo de trabajo científico es el proceso de combinación de datos y procesos en un conjunto configurable y un conjunto estructurado de medidas que implementan soluciones de cálculo semi-automáticas de un problema científico. Los sistemas de flujo de trabajo científico a menudo proporcionan interfaces gráficas de usuario para combinar diferentes tecnologías junto con los métodos eficientes para el uso de ellos y por lo tanto aumentar la eficiencia de los científicos.

El proyecto Kepler está dedicado a fomentar y apoyar las capacidades, el uso y el conocimiento de la fuente libre y abierta, bien cómo la aplicación de flujo de trabajo científico. Kepler está diseñado para ayudar a los científicos, analistas y programadores a crear, ejecutar y compartir modelos y análisis a través de una amplia gama de disciplinas científicas y de ingeniería. Kepler puede operar sobre los datos almacenados en una variedad de formatos, a nivel local como a través de internet y es un entorno eficaz para la integración de componentes de software dispares, como la fusión scripts de “R” con código “C” compilado o facilitar la ejecución remota y distribuida de modelos. Usando el interfaz gráfica de usuario de Kepler, los usuarios sólo tienen que seleccionar y luego conectar los componentes analíticos pertinentes y fuentes de datos para crear un “flujo de trabajo científico” - una representación ejecutable de los pasos necesarios para generar resultados. El software ayuda a los usuarios de Kepler compartir y reutilizar datos, flujos de trabajo y desarrollar componentes por la comunidad científica para hacer frente a necesidades comunes.

PRIVATIVO

ARCGIS

ArcGis es un sistema completo de diseño y gestión de soluciones a través de la aplicación del conocimiento geográfico. ESRI proporciona una gama de productos listos para usar, con datos de alta calidad para su visualización en SIG y análisis de proyectos.

ENVI

La familia de productos ENVI proporciona una variedad de soluciones de software para procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales utilizado por los científicos, investigadores, analistas de imagen, y profesionales de GIS en todo el mundo. Las soluciones de ENVI combinan la última de procesamiento de imágenes espectral y la tecnología de análisis de imágenes con una interfaz intuitiva y fácil de usar que ayudan a obtener información significativa a partir de imágenes.

8.1.2 Lenguajes de programación

LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN R

R es un lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico. Se trata de un proyecto de software libre, resultado de la implementación GNU del premiado lenguaje S.

R y S-Plus -versión comercial de S- son, probablemente, los dos lenguajes más utilizados en investigación por la comunidad estadística, siendo además muy populares en el campo de la investigación biomédica, la bioinformática y las matemáticas financieras. A esto contribuye la posibilidad de cargar diferentes

bibliotecas o paquetes con finalidades específicas de cálculo o gráfico. R se distribuye bajo la licencia GNU GPL y está disponible para los sistemas operativos Windows, Macintosh, Unix y GNU/Linux.

R proporciona un amplio abanico de herramientas estadísticas (modelos lineales y no lineales, tests estadísticos, análisis de series temporales, algoritmos de clasificación y agrupamiento, etc.) y gráficas. Al igual que S, se trata de un lenguaje de programación, lo que permite que los usuarios lo extiendan definiendo sus propias funciones. De hecho, gran parte de las funciones de R están escritas en el mismo R, aunque para algoritmos computacionalmente exigentes es posible desarrollar bibliotecas en C, C++ o Fortran que se cargan dinámicamente. Los usuarios más avanzados pueden también manipular los objetos de R directamente desde código desarrollado en C. R también puede extenderse a través de paquetes desarrollados por su comunidad de usuarios.

R hereda de S su orientación a objetos. La tarea de extender R se ve facilitada por su permisiva política de *lexical scoping*. Además, R puede integrarse con distintas bases de datos y existen bibliotecas que facilitan su utilización desde lenguajes de programación interpretados como Perl y Python.

Otra de las características de R es su capacidad gráfica, que permite generar gráficos con alta calidad. R posee su propio formato para la documentación basado en LaTeX.

R también puede usarse como herramienta de cálculo numérico, campo en el que puede ser tan eficaz como otras herramientas específicas tales como GNU Octave y su versión comercial, MATLAB.4 Se ha desarrollado una interfaz, RWeka5 para interactuar con Weka que permite leer y escribir ficheros en el formato arff y enriquecer R con los algoritmos de minería de datos de dicha plataforma.

R forma parte de un proyecto colaborativo y abierto. Sus usuarios pueden publicar paquetes que extienden su configuración básica. Existe un repositorio oficial de paquetes cuyo número superó en otoño de 2009 la cifra de los 2000.

Dado el enorme número de nuevos paquetes, éstos se han organizado en vistas (o temas), que permiten agruparlos según su naturaleza y función. Por ejemplo, hay grupos de paquetes relacionados con estadística bayesiana, econometría, series temporales, etc.

Para facilitar el desarrollo de nuevos paquetes, se ha puesto a servicio de la comunidad una forja de desarrollo que facilita las tareas relativas a dicho proceso.

Una alternativa al lenguaje de programación R es Python (<http://python.org/>) que destaca también por su gran potencialidad.

IDL

IDL (*Interactive Data Language*), es un lenguaje de programación utilizado para el análisis de datos. Es popular en determinadas áreas de la ciencia, tales como la astronomía y la imagen médica para crear visualizaciones significativas de los complejos datos numéricos. Desde programas de análisis de pequeña escala a las aplicaciones de un gran despliegue de aplicaciones, IDL proporciona el entorno informático integral que necesita para obtener eficazmente la información de sus datos.

IDL es vectorizado, numérico e interactivo, y se utiliza comúnmente para el tratamiento interactivo de grandes cantidades de datos (incluyendo el procesamiento de imágenes). La sintaxis incluye muchas construcciones de Fortran y algunas de C.

IDL comparte una sintaxis común con e PV-Wave y su origen en la misma base de código, aunque las lenguas posteriormente han divergido en detalle. También hay una implementación libre, Lenguaje de Datos GNU (GDL).

POSTGRESQL

PostgreSQL, a menudo simplemente Postgres, es un sistema de base de datos objeto- relacional (ORDBMS) disponible para muchas plataformas, incluyendo Linux, FreeBSD, Solaris, Microsoft Windows y Mac OS X. Los lenguajes de procedimiento (llamados de procedimientos almacenados) permiten a los bloques de código ser ejecutados por el servidor de base de datos y pueden ser escritos en otros lenguajes de programación que no sea SQL y C.

Es liberado bajo la licencia de PostgreSQL, que es un MIT al estilo de la licencia, por lo que se trata de un software de código libre y abierto. PostgreSQL es desarrollado por el Grupo de Desarrollo Global de PostgreSQL, que consiste en un puñado de empleados voluntarios de la comunidad y supervisado por empresas como Red Hat y EnterpriseDB. Se implementa la mayoría de la SQL: 2008 estándar, es compatible con ACID, es completamente transaccional (incluyendo todas las instrucciones de DDL), tiene tipos de datos extensibles, operadores y los índices y tiene un gran número de extensiones por escrito por parte de terceros.

La gran mayoría de distribuciones de Linux tienen PostgreSQL disponibles en paquetes suministrados. Mac OS X, a partir de León, dispone de un servidor PostgreSQL como base de datos estándar por defecto en la edición de servidor y las herramientas de cliente de PostgreSQL en la edición de escritorio.

PostgreSQL incluye una función de apoyo a B+árbol, hash, árboles de búsqueda generalizadas (GIST) y índices invertidos generalizados (GIN). Además, los métodos del índice definidos por el usuario del índice pueden ser creados, aunque esto es un proceso muy complicado.

8.2 Necesidad de hardware y almacenamiento

Los requisitos mínimos de hardware son: Procesador: Quadcore 2.26 GHz. RAM: 8 GB Disco duro: 4 TB + 4TB para hacer copia de seguridad periódicamente Sistema Operativo: 64 bits (imprescindible)

9 Política de visualización y difusión de los datos

9.1 Política de difusión de datos

Se deberían diferenciar dos niveles básicos de difusión y transferencia de los datos:

Nivel de usuario común: este usuario tendría acceso a la visualización de todos los productos que se genere.

Nivel de usuario avanzado (científicos y gestores): además de la visualización, debería existir la posibilidad de descargar datos y mapas bajo diferentes permisos y políticas de citación. Al descargar los datos brutos, que son propiedad de MODIS, se debería pedir al usuario que citara a la plataforma para indicar el lugar de donde los ha descargado. Para la descarga de datos procesados sería preciso proporcionar al usuario alguna fórmula para que citara a los autores de la plataforma. Finalmente, el sistema que ha sido diseñado con software libre y código abierto, por las enormes potencialidades de mejora e intercambio de experiencias que esto ofrece, debería contar con una licencia *Creative Common* en la que figurara todos el equipo que ha dado lugar a la plataforma.

9.2 Descarga de datos

La descarga de datos debería ser posible, tanto a partir de los mapas como de las gráficas. Para facilitar el intercambio de la información, será necesaria que esta cumpla con los estándares del OGC (*Open GIS Consortium*). De esta forma los mapas deberían ser visualizables e integrables en SIG en cualquiera de estos formatos:

- GML - Lenguaje de Mercado Geográfico (no confundir con Lenguaje de Mercado Generalizado, también GML)
- KML – *Keyhole Markup Language* es un lenguaje de marcado basado en XML para representar datos geográficos en tres dimensiones
- WFS - *Web Feature Service* o Servicio de entidades vectoriales que proporciona la información relativa a la entidad almacenada en una capa vectorial (cobertura) que reúnen las características formuladas en la consulta
- WMS - *Web Map Service* o Servicio de mapas en la web que produce mapas en formato imagen a la demanda para ser visualizados por un navegador web o en un cliente simple
- WCS - *Web Coverage Service*
- CSW - *Web Catalogue Service*

La descarga de los mapas debería hacerse bajo petición, y el producto debería también contar con la autoría del equipo que crea la plataforma.

Para el caso de los datos que soportan a las gráficas, éstos deberían poder descargarse en forma CSV, Excel y XML.

Los ficheros CSV (del inglés *Comma-Separated Values*) son un tipo de documento en formato abierto sencillo para representar datos en forma de tabla, en las que las columnas se separan por comas (o punto y coma en donde la coma es el separador decimal: España, Francia, Italia, etc.) y las filas por saltos de línea. Los campos que contengan una coma, un salto de línea o una comilla doble deben ser encerrados entre comillas dobles.

El formato CSV es muy sencillo y no indica un juego de caracteres concreto, ni cómo van situados los bytes, ni el formato para el salto de línea. Estos puntos deben indicarse muchas veces al abrir el fichero, por ejemplo, con una hoja de cálculo.

Además sería muy interesante poder visualizar los datos superpuestos con un mapa

(<http://seamap.env.duke.edu/species/179913>).

Las siguientes direcciones pueden ayudar a comprender mejor las funcionalidades de OGC:

- <http://www.opengeospatial.org/>
- http://www.ideo.es/show.do?to=pideep_catalogo.ES
- <http://www.opengeospatial.org/pressroom/pressreleases/944>

10 Alternativas de desarrollo y coste

Se han previsto tres niveles de desarrollo (ver apdos 2.4 y 3.2) referidos fundamentalmente a la escala espacial que cubren los análisis (Nacional, Red de PPNN y Ecosistemas dentro de un PN) (Tabla 10.1). Puesto que el procesamiento de las imágenes se hará para el conjunto de los tiles MODIS que incluyen al territorio español, hay una gran parte del procesamiento que es común a todos los niveles.

Acción/Subsistema	Nivel de desarrollo al que afecta	Escalas de Análisis	LP	Software	Productos de visualización
Descarga y actualización de imágenes	Procesamiento común a todos los niveles	Nacional Red Ecosistemas	R	GRASS, QGIS, ArcGIS	Mapas 1, 4 y 6 Gráficos 1 y 2
Filtrado por calidad			R		
Relleno de huecos en la serie temporal			R		
Cálculo de atributos			R, IDL		
Estimación de tendencias			R		
Detección de anomalías temporales			R		
Detección de alertas tempranas			R		
Evaluación de la relevancia de las alertas			R		
Reproyección			MRT		
Mosaico			R		
Integración visor cartográfico		Mapserver, Pmapper			
Gestión del flujo de trabajo		Kepler			
Adquisición de los datos de referencia	II, III	Red Ecosistemas	R	GRASS, QGIS, ArcGIS	
Extracción de la información de la imagen			R		
Integración en base de datos			SQL	PostgreSQL	
Detección de anomalías espaciales	III	Ecosistemas	R	SQL	Mapa tipo 8

Tabla 10.1. Alternativas de desarrollo del sistema de seguimiento

Se recomienda como nivel mínimo de desarrollo el de Red de PPNN (Nivel II). La incorporación del nivel Nacional (Nivel I) sería perfectamente factible, ya que no se requiere ningún procesamiento adicional de las imágenes. Sin embargo, si se requeriría un trabajo adicional especialmente para la integración en el visor de los productos de visualización. El nivel de ecosistema (Nivel III), es un nivel muy deseable, ya que informaría sobre el comportamiento de los ecosistemas de cada uno de los parques. No obstante, la adquisición de este nivel representa un trabajo adicional puesto que requiere la integración de la información espectral y de la información ambiental para la caracterización de los píxeles en un base de datos, mediante operaciones más complejas que para el nivel II. En cualquier caso, este esfuerzo dependerá de la facilidad o exigencia de la información ambiental (geo-referenciada) que se requiera/disponga.

Para cada una de estas alternativas de desarrollo los costes serían los siguientes.

1) Nivel de desarrollo I:

Tiempo: 6-8 meses (Dependerá de los esfuerzos de mejora de los productos de visualización que se deseen).

Personal: 1 técnico cualificado con experiencia en programación en los lenguajes de programación que se proponen y con habilidades para el aprendizaje de nuevo software.

2) Nivel de desarrollo II:

Tiempo: 8-10 meses (Dependerá de los esfuerzos de mejora de los productos de visualización que se deseen).

Personal: Idém anterior.

3) Nivel de desarrollo III:

Tiempo: 12-15 meses (Dependerá de los esfuerzos de mejora de los productos de visualización que se deseen).

Personal: Idém anterior.

En todos los casos sería recomendable un alto nivel de formación y creatividad de la persona a contratar, y el asesoramiento científico por parte del equipo del CAESCG-Universidad de Almería.

11 Bibliografía

- Alcaraz-Segura, D., E. H. Berbery, Lee, S-J., Paruelo, J.M., 2011. *Use of Ecosystem Functional Types to represent the interannual variability of vegetation biophysical properties in regional models*. CLIVAR Exchanges 17 (3): 23-27.
- Alcaraz-Segura, D., Liras, E., Tabik, S., Paruelo, J.M., 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.
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J.M., Delibes, M., 2009. *Assessing protected areas to face environmental change through satellite-derived vegetation greenness: The case of the Spanish National Parks*. Environmental Management, 43, 38-48.
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., 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., Delibes, M., 2009b. *Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a national park network: a remote sensing approach*. Environmental Management 43, 38e48.
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J.M., Delibes, M., 2009c. *Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a National Park network: a remote sensing approach*. Environ. Manage. 43:38-48.
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J.M., Delibes, M., 2008. *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., Paruelo, J.M., Delibes, M., 2008b. *Trends in the surface vegetation dynamics of the National Parks of Spain as observed by satellite sensors*. Appl. Veg. Sci. 11:431-440. doi:10.3170/2008-7-18522.
- Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F., 2008c. *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., Paruelo, J., and Cabello, J., 2006. *Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula*. Global Ecology and Biogeography, 15, 200-212.
- Alcaraz-Segura, D., 2005. *Caracterización mediante teledetección del funcionamiento de los ecosistemas ibéricos. Bases para la conservación de la biodiversidad en un escenario de cambio global*. PhD dissertation, Editorial Universidad de Almería, Almería, Spain.
- Araújo, M.B., Cabeza, M., Thuiller, W., Hannah, L., Williams, 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.
- Beever, E.A., 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. Davidson. S.B., 2006. *A Model for User-Oriented Data Provenance in Pipelined Scientific Workflows*. In International Provenance and Annotation Workshop (IPAW), LNCS, 2006.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Altesor, A., Delibes, M., Liras, E., 2008. *Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación*. Ecosistemas 17 (3): 53-63.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Ferrero, R., Castro, A.J., 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. & Paruelo, J. 2012b. *The ecosystem functioning dimension in conservation biology: insights from remote sensing*. Biodiversity and Conservation. En 2ª revisión
- Carr, M. H., Woodson, C. B., Cheriton, O.M., Malone, D., McManus, M.A., Raimondi, P.T., 2010. *Knowledge through partnerships: integrating marine protected area monitoring and ocean observing systems*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9 (6): 342-350.
- 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., Wear, D., 2001. *Ecological forecast: an emerging imperative*. *Science* 293, 657.
- Constanza, R., d'Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. *The value of the world's ecosystem services and natural capital*. *Nature*, 387: 253-260
- Costanza, R., Norton, B.G., Haskell, B.D., 1992. *Ecosystem health: Newgoals for environmental management*. Island Press, Washington DC.
- Crabtree, R., Potter, C., Mullen, R., Sheldon, J., Huang, S., Harmsen, J., Rodman, A., Jean, C., 2009. *A modeling and spatio-temporal analysis Framework for monitoring environmental change using NPP as an ecosystem indicator*. *Remote Sensing of Environment* 113:1486–1496.
- 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., Woodwell, G.M., 1997. *Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems*. *Issues in Ecology* 2:1–16. di Bella, C.M., Rebella, C.M., 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., 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)*. *International Perspectives on Global Environmental Change*. S. S. Young and S. E. Silvern, InTech: 355-374.
- Garbulsky, M.F., Paruelo, J.M., 2004. *Remote sensing of protected areas to derive baseline vegetation functioning characteristics*. *J Veg Sci* 15:711–720.
- Grantham, H. S., Bode, M., McDonald-Madden, E., Game, E.T., Knight, A.T., Possingham, H.P., 2009. *Effective conservation planning requires learning and adaptation*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8 (8): 431-437.
- 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., Visconti, G., Beniston, M., Iannorelli, E., D. Barba, D., 2001. *The role of a global protected areas system in conserving biodiversity in the face of climate change*. *Global Change and Protected Areas*. M. Beniston. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers: 413-422.
- Hey, T., Tansley, S., Tolle, K., 2009. *The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery*. Microsoft Research, Redmond, Washington. Jax, K., 2010. *Ecosystem Functioning*. Cambridge University Press. pp.272.
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N., Roy, D.P., Morisette, J.T., 2002. *An overview of MODIS Land data processing and product status*. *Remote Sensing of Environment*, 83, 3-15.
- Kaplan, D. M., S. Planes, Fauvelot, C., Brochier, T., Lett, C., Bodin, N., Le Loc'h, F., Tremblay, Y., Georges, J., 2010. *New tools for the spatial management of living marine resources*. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (1–2): 88-93.
- Kennedy, R.E., Townsend, P.A., Gross, J.E., Cohen, W.B., Bolstad, P., Wang, Y.Q., 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.
- Leverington, F., Hockings, M., 2004. *Evaluating the effectiveness of protected area management: the challenge of change*. In: Barber, C.V., Miller, R.K., Boness, M. (eds) Securing protected areas in the face of global change: issues and strategies. IUCN, Gland, Switzerland, pp. 169–214.
- 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., Likens, G.E., 2010. *The science and application of ecological monitoring*. Biological Conservation 143: 1317-1328.
- Ludwig, J.A., Tongway, D.J., Bastin, G.N., 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., Pressey, R.L., 2000. *Systematic conservation planning*. Nature 405 (6783):243–253.
- McLeod, E., Salm, R., Green, A., Almany, J., 2008. *Designing marine protected area networks to address the impacts of climate change*. Frontiers in Ecology and the Environment 7(7): 362-370.
- McNaughton, S., Oesterheld, M., Frank, D.A., Williams, K.J., 1989. *Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats*. Nature 341, 142 – 144.
- Meffe, G.K., Groom, M.J., Carroll, C.R., 2006. *Ecosystem approaches to conservation: responses to a complex world*. In: Groom, M.J., Meffe, G.K., Carroll, C.R. (eds) Principles of conservation biology. Sinauer Associates, Sunderland, MA, pp 419–508.
- Michener, W.K., Jones, M.B., 2012. *Ecoinformatics: supporting ecology as a data-intensive science* Trends in Ecology and Evolution 27(2) 85-93.
- Milchunas, D.G., Lauenroth, W.K., 1995. *Inertia in plant community structure: state changes after cessation of nutrient Enrichment stress*. Ecol Appl 5:1195–2005.
- Monteith, J.L., 1972. *Solar radiation and productivity in tropical ecosystems*. Journal of Applied Ecology 9, 747-766.
- Monteith, J., 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., Nemani, R.R., 1997. *Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991*. Nature 386: 698-702.
- Nemani, R., Hashimoto, H., Votava, P., Melton, F., Wang, W., Michaelis, A., Mutch, L., Milesi, C., Hiatt, S., White, M., 2009. *Monitoring and forecasting ecosystem dynamics using the Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS)*. Remote Sensing of Environment 113 (7): 1497-1509.
- Oyonarte, C., Alcaraz-Segura, D., Oyarzabal, M., Paruelo, J.M., Cabello, J., 2010. *Sistema de apoyo a la gestión de reservas de la biosfera basado en el monitoreo de la productividad primaria: ensayo en Cabo de Gata-Níjar (Almería-España)*. In: Araya, P., Clüsener-Godt, M. (Eds.), Reservas de la Biosfera: Su Contribución a la Provisión de Servicios de los Ecosistemas. Experiencias Exitosas en Iberoamérica. UNESCO, Paris, pp. 119-140.
- Paruelo, J.M., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C., 1997. *ANPP Estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States*. Ecology 78(3): 953-958.
- Palumbi, S. R., S. D. Gaines, Leslie, H., Warner, R.R., 2003. *New Wave: High Tech Tools to Help Marine Reserve Research*. Frontiers in Ecology 1 (2).
- Paruelo, J., Alcaraz-Segura, D., Volante, J.N., 2011. *El seguimiento del nivel de provisión de los servicios ecosistémicos*, In: Valoración de Servicios Ecosistémicos: Conceptos, Herramientas y Aplicaciones para el Ordenamiento Territorial, Laterra P, E. Jobbágy & J. Paruelo, (Ed.), 141-162, Ediciones INTA, ISBN 978-987-679-018-5, Buenos Aires.

- Paruelo, J.M., 2008. *La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos*. Ecosistemas, 17, 4-22.
- Paruelo, J.M., Piñeiro, G., Oyonarte, C., Alcaraz, D., Cabello, J., Escribano, P., 2005. *Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas of Southeastern Spain*. Applied Vegetation Science 8, 93-102.
- Pelkey, N.W., Stoner, C.J., 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.
- Peterson, D. L., Wright, R. G., 1996. *Research in parks and protected areas: forging the link between science and management*. National Parks and protected areas. Their role in environmental protection. Cambridge, Massachusetts, Blackwell Science: 417-434.
- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.M., Tucker, C.J., 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.
- Roy, D. P., Borak, J. S., Devadiga, S., Wolfe, R. E., Zheng, M., Descloitres, J., 2002. *The MODIS Land product quality assessment approach*. Remote Sensing of Environment 83 62-76.
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R.R. and 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.
- Salvador, M.F., Avaria, C.C., 2008. *Variability of sea surface temperature, identification of coastal upwelling and its relevance in protected marine and coastal areas of the desert of Atacama, Chile*. Revista de Geografía Norte Grande (41): 49-61.
- Solano, R., Didan, K., Jacobson, A., Huete, A., 2010. *MODIS Vegetation Indices (MOD13) C5 User's Guide. Version 2.00*. (University of Arizona, Terrestrial Biophysics and Remote Sensing Lab). http://vip.arizona.edu/MODIS_Project.php (Último acceso 01/03/2012).
- Tucker, C.J., Sellers, P.J., 1986. *Satellite remote-sensing of primary production*. International Journal of Remote Sensing, 7, 1395-1416.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., Steininger, M. 2003. *Remote sensing for biodiversity science and conservation*. Trends in Ecology and Evolution 18: 306-314.
- Virginia, R., 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., Zhu, Z., 2009. *Monitoring forest changes in the Southwestern United States using multitemporal Landsat data*. Remote Sensing of Environment, 113 (8) 1739-1748
- Volante, J.N., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M.J., Viglizzo, E.F., Paruelo, J.M., 2011. *Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina*. Agriculture, Ecosystems and Environment in press.
- Wiegand, T., H. A. Snyman, Kellner, K., Paruelo, J.M., 2004. *Do grasslands have a memory: Modeling phytomass production of a semiarid South African grassland*. Ecosystems 7 (3): 243-258.
- Zorn, P., Stephenson, W., Grigoriev, P., 2001. *An ecosystem management program and assessment process for Ontario national parks*. Conservation Biology 15 (2):353-362.

Anexo I: PROPUESTA TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA BÁSICO DE SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE LA VEGETACIÓN CON DATOS MODIS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA COMO APOYO AL PLAN DE SEGUIMIENTO EXTENSIVO DE LA RED DE PP.NN. DURANTE EL PERIODO 2012/13.

1 Objetivos

El objetivo de esta Asistencia Técnica es proporcionar al Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN) información sistemática y actualizada de parámetros biofísicos derivados de datos de observación de la Tierra (MODIS), que contribuya al seguimiento del estado de la vegetación en la Red de PP.NN.

Se propone un sistema de bajo coste, basado en una metodología estandarizada y común a todos los PP.NN, a partir del análisis de series temporales de imágenes MODIS y variables funcionales derivadas de ellos, desde el año 2000 hasta la actualidad.

Como resultado de esta asistencia se generarán unos informes mensuales que mostrarán unos mapas de tendencias y anomalías a nivel de PP.NN., y sus perímetros de influencia, obtenidos por comparación de los datos actuales (2012/13) con la serie de datos MODIS histórica (desde el año 2000 a la actualidad). Dichos mapas podrán ser usados por los gestores de la OAPN como datos de apoyo para el seguimiento de los cambios en el funcionamiento ecosistémico de los PP.NN., de manera que permitirán focalizar los recursos de gestión hacia las zonas donde se observa una modificación en su patrón de comportamiento.

La información se proporcionará mensualmente en formato ráster compatible con el resto de información SIG de la OAPN. Los productos generados en esta asistencia tendrán, por tanto, las características adecuadas (formato, nomenclatura, metadatos, etc) para ser visualizados y consultados dentro del SIG del OAPN. Asimismo se diseñará y generará un informe anual ejecutivo compuesto por mapas y gráficos que resuman la situación y estado de la vegetación en cada Parque.

2 Datos de partida

Se propone la utilización de datos de baja resolución espacial y alta frecuencia temporal proporcionados por el sensor MODIS (NASA) para el seguimiento del estado de la vegetación. Estos datos son suministrados de forma sistemática por la NASA en distintos niveles de procesado, de manera que permiten desarrollar sistemas de seguimiento estandarizados (índices y algoritmos proporcionados por NASA) para cualquier zona de la Tierra.

En un primer momento se pretende utilizar, únicamente, el índice de vegetación normalizado, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de MODIS que proporciona información sobre la actividad vegetativa y por tanto sobre el estado de la vegetación.

Para esta asistencia técnica se utilizará el compuesto de 16 días de NDVI, a 250 m de resolución espacial, producto "MOD13 Q1" (nivel de procesado L3), disponible en la base de datos de la NASA.

En fases posteriores se podría ir ampliando la asistencia con otros índices de interés en la caracterización y seguimiento de ecosistemas como puede ser el NDWI (Normalized Difference Water Index, relacionado con el contenido en humedad) o el fPAR (variable biofísica relacionada con la estructura del dosel vegetal y la producción primaria de las plantas).

3 Desarrollo metodológico

Con esta asistencia técnica se pretende poner en marcha un sistema de seguimiento para la generación y análisis de una serie de variables funcionales relacionadas con la productividad primaria y la fenología a nivel de la Red de PP.NN. Estas variables funcionales permitirán identificar su variabilidad estacional e interanual, como indicadores o descriptores del funcionamiento ecosistémico.

Como resultado del análisis comparativo de los datos actuales (compuestos 16 días de NDVI en 2012/13) con la serie histórica de NDVI MODIS, desde el año 2000 a la actualidad, se obtendrá una cartografía de tendencias y anomalías que permitirá establecer un sistema de prealertas que sirvan de referencia al OAPN para su gestión.

A continuación se describen las distintas fases de trabajo:

1. Definición del sistema básico de Teledetección MODIS

En este apartado se incluye:

- Creación del modelo de datos y gestión de los flujos de trabajo.
- Automatización del proceso de descarga de datos MODIS del servidor de imágenes de la NASA, producto “MOD13 Q1” (nivel de procesado L3) de la Península Ibérica, Baleares y Canarias, con resolución temporal de 16 días y resolución espacial de 250 metros.
- Creación del archivo de datos histórico (2000 a la actualidad) y la descarga de los compuestos de 16 días recientes.
- Depuración básica de la serie de datos MODIS. El producto MOD13 incluye una capa de calidad que proporciona información sobre la calidad general de la imagen y contiene datos relativos a la presencia de nubes, aerosoles, nieve, así como las correcciones atmosféricas.

Esta banda se utilizará para realizar el filtrado de los datos según los filtros de calidad de nubes y aerosoles proporcionados por la NASA (LDOPE Tools). En este punto también se realizará una revisión para comprobar la existencia de datos perdidos y si es necesario hacer reajustes del filtrado de calidad.
- Reproyección y mosaicado nacional: Los datos MODIS se suministran en celdas de 10° en proyección sinusoidal. Para completar el territorio nacional son necesarias 5 celdas. Una vez realizado el procesado de los datos se realizará la reproyección de los celdas a ETRS89 (Península y Baleares huso 30 y Canarias en huso 28) y su mosaicado a escala nacional.

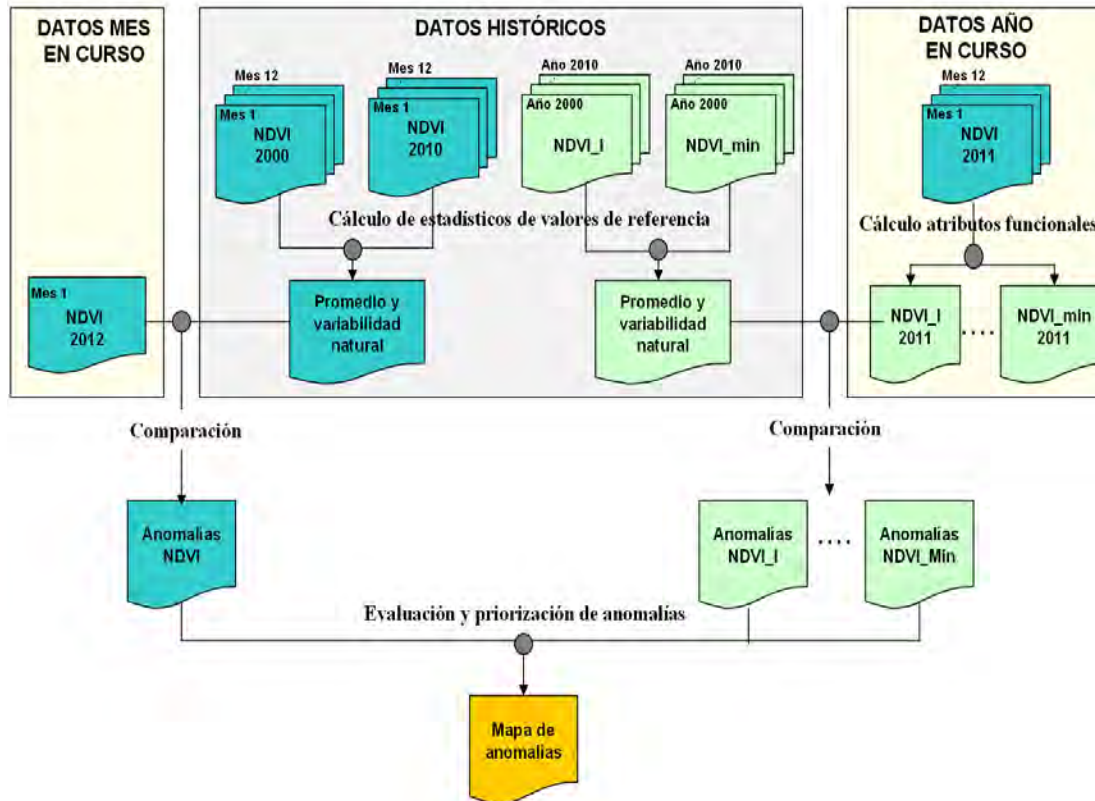
2. Análisis de datos MODIS y generación de informes mensuales de tendencias y anomalías sobre el estado de la vegetación en los PP.NN.

Abarca el análisis de los datos MODIS para establecer los valores de referencia y detección de anomalías mensuales a nivel de píxel dentro de los PPNN y su perímetro de influencia.

- Cálculo de los valores de referencia: A partir de la serie histórica de los compuestos de 16 días de NDVI se calcularán unos estadísticos básicos que permitan establecer las condiciones de referencia: NDVI medio para el conjunto de la serie, desviación estándar y valores máximos y mínimos registrados.

Estos estadísticos básicos servirán para fijar los límites superior e inferior que definen los niveles de referencia, considerados como valores de NDVI “normales”. Esta información será almacenada en una capa ráster que se irá actualizando con los nuevos datos.
- Detección y evaluación de anomalías: Mediante comparación de los valores del índice o atributo de la fecha de estudio con los valores de referencia se determinará en qué momento estos son significativamente distintos a los esperados según la variabilidad natural o los rangos de referencia establecidos para esa zona y fecha.

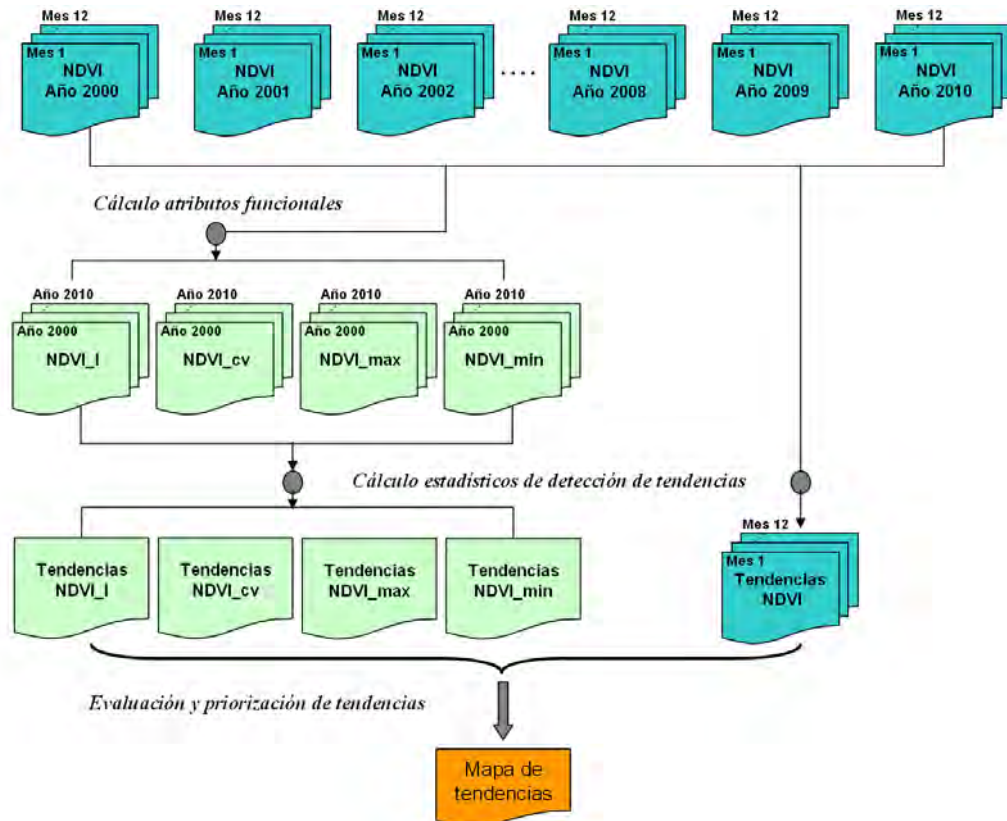
Además se establecerá un sistema de evaluación del significado y grado de severidad de la anomalía (desviación del valor del píxel respecto a sus valores promedio), de manera que se obtenga un ráster final depurado de anomalías clasificado según su importancia.



Esquema metodológico del cálculo de anomalías temporales. En azul se muestran los índices de vegetación para cada año de estudio. En verde se muestran los atributos funcionales calculados anualmente a partir de la curva anual del NDVI.

- Estimación de tendencias: A partir de la serie histórica, también se analizará la existencia de tendencias, entendido estas como la persistencia en un sentido determinado de los valores de cambio obtenidos para un índice o atributo funcional determinado a lo largo del período de estudio. De esta forma, una tendencia positiva será aquella en la que se registre un aumento positivo del valor del índice/atributo y negativa cuando la tendencia sea una disminución.

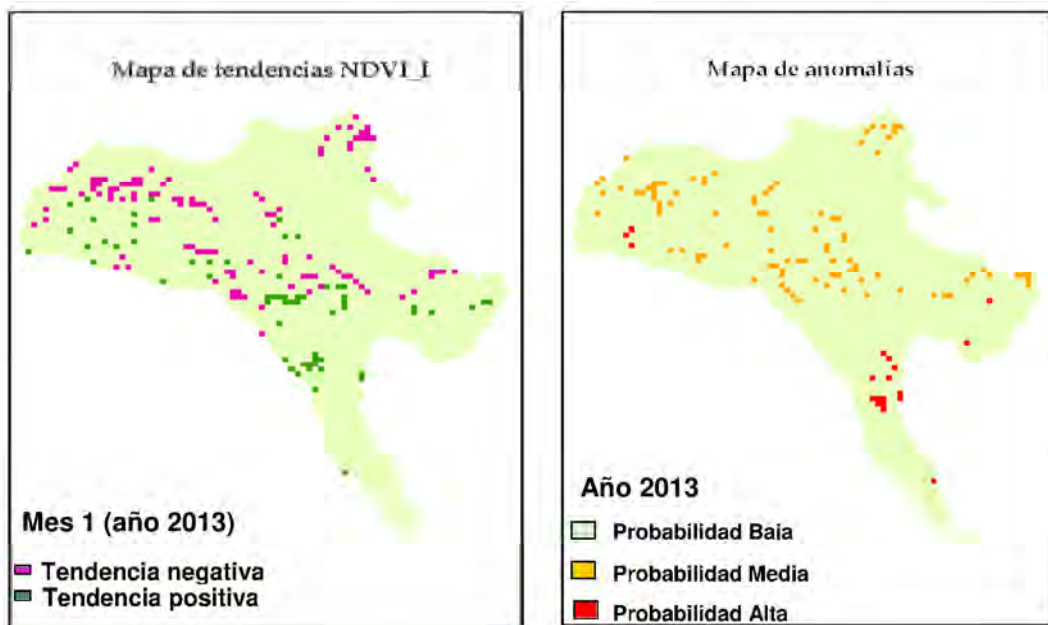
Asimismo, se llevará a cabo una evaluación de las tendencias (a partir del grado de significación de las mismas y la co-existencia de tendencias para un píxel en varios índices/atributos funcionales) para obtener un mapa final de tendencias.



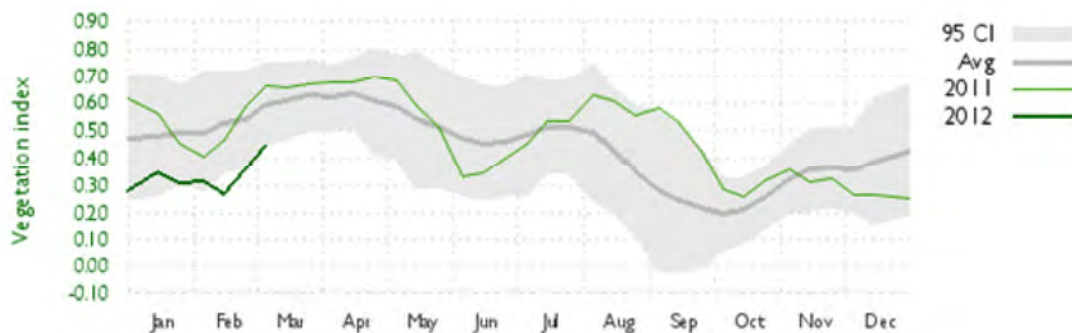
Esquema metodológico para el cálculo de los atributos funcionales y la identificación de tendencias. En azul se muestran los índices de vegetación para cada año de estudio (en este ejemplo desde el año 2000 al 2010). En verde se muestran los atributos funcionales calculados anualmente a partir de la curva anual del NDVI.

- Elaboración de resultados y entregables: Los productos que se entregarán al OAPN estará compuesto por:
 - o Informe mensual. Incluirá los mapas de tendencias y anomalías en el estado de la vegetación derivados del NDVI para los PP.NN. y su área de influencia.
 - o Informe anual. Incluirá los mapas y gráficos de tendencias y anomalías en el estado de la vegetación derivados del NDVI para los PP.NN. y su área de influencia.

A continuación se muestra un ejemplo del tipo de mapas y gráficos que ilustrarán los informes.



Ejemplo de Mapa de Tendencias y Anomalías.



Ejemplo de gráfico tipo en el que se compara la evolución del índice de vegetación del año actual en relación a la serie histórica. La zona sombreada indica los límites del intervalo de confianza y las líneas en verde la evolución del índice de vegetación en 2011 y 2012. Extraído de <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/APAAT/>.

3. Análisis y desarrollo para el avance y mejora del sistema de Teledetección en el seguimiento de la vegetación.

Esta tarea permitirá ir incorporando al Sistema Básico de teledetección las propuestas de la Dirección de los trabajos en relación a:

- La incorporación y seguimiento de ideas descritas en programas internacionales de seguimiento del estado de ecosistemas por Teledetección para el avance continuo del Plan de Seguimiento Español. Algunos ejemplos de programas de interés se pueden consultar en las páginas web: <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/APAAT/> del JRC y en <http://ecocast.arc.nasa.gov/> de la NASA.
- Incorporación de nuevos índices y atributos funcionales de interés:
 - o Nuevos índices de teledetección como el NDWI o fPAR.
 - o Otros índices climatológicos: precipitación, temperatura, etc.
 - o Análisis de nuevos atributos que proporcionen información sobre la productividad y la fenología.
- Adaptación progresiva del sistema de seguimiento a nivel de sistemas naturales.

4. Integración de los informes de seguimiento de la vegetación derivados de teledetección en un servicio web / Creación de un visor cartográfico

4 Cronograma

La duración de esta asistencia técnica será de 15 meses.

Los primeros cuatro meses, entre septiembre y diciembre de 2012, se dedicarán a la definición y puesta en producción del sistema de Teledetección MODIS y a la creación de la base de datos histórica (2000-2012). En enero de 2013 comenzará la producción de los informes mensuales del estado de la vegetación.

5 Presupuesto.

El presupuesto de ejecución material es de ciento once mil quinientos treinta euros (111.530 €). Este presupuesto se desglosa en las siguientes actividades:

1. Definición del sistema básico de Teledetección MODIS y puesta en producción.	25.180,50
2. Producción de informes mensuales y anual de seguimiento del estado de la vegetación por Teledetección en 2013.	58.084,14
3.- Análisis y desarrollo para el avance y mejora continua del sistema en el periodo 2013.	28.265,60
TOTAL Ejecución Material	111.530,24
18% IVA	20.075,44
TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR ADMINISTRACIÓN	131.605,68

Anexo II: Presentación de la guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales de España