

Evaluación y seguimiento de la desertificación en España

Mapa de la Condición de la Tierra 2000-2010



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

Centro de Publicaciones: Paseo de la Infanta Isabel, 1 - 28014 Madrid

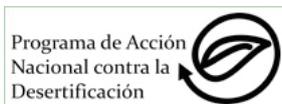




Evaluación de la desertificación en España

Mapa de la Condición de la Tierra 2000-2010





Aviso legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización.

La coordinación de esta guía ha sido realizada por Leopoldo Rojo Serrano. *Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.*

En la redacción y preparación de la presente publicación han intervenido las siguientes instituciones y técnicos:

Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: Leopoldo Rojo Serrano.

Estación Experimental de Zonas Áridas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC): María E. Sanjuán, Gabriel del Barrio, Alberto Ruiz y Juan Puigdefábregas.

Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. (TRAGSATEC, Grupo TRAGSA): Araceli Martínez Ruiz.

Cita bibliográfica recomendada: Sanjuán, M. E.; del Barrio, G.; Ruiz, A.; Rojo, L.; Puigdefábregas, J., y Martínez, A.; 2014. *Evaluación de la desertificación en España: Mapa de la Condición de la Tierra 2000-2010.* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 80 pp."



MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

Edita:

© Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

Distribución y venta:

Paseo de la Infanta Isabel, 1
28014 Madrid
Teléfono: 91 347 55 41
Fax: 91 347 57 22

Maquetación e Impresión:

DIN Impresores

Encuadernación:

DIN Impresores

Tienda virtual: www.magrama.es
centropublicaciones@magrama.es

NIPO: 280-14-128-4

ISBN: 978-84-491-1395-6

Depósito Legal: M-21686-2014

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

Datos técnicos: Formato: 21 x 29,7 cm. Caja de texto: 17 x 23,7 cm. Composición: una columna. Tipografía: Palatino. Cuerpo: 10 pt. Encuadernación: Pliegos de 32 páginas. Tintas: 4 colores. Papel cubierta: Novatech Mate 350 grs. Papel interior: Novatech Mate, doble capa 115 grs, certificado PEFC.



Lista de siglas

ANUSPLIN	Programa informatizado para el tratamiento de datos espaciales
AI	Índice de aridez (AI)
CNULD	Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación
CORINE	COoRdinate INformation on the Environment
COS	Carbono Orgánico del Suelo
CST	Comité de Ciencia y Tecnología de la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación
EEZA-CSIC	Estación Experimental de Zonas Áridas de la Agencia Estatal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas
EPSG	European Petroleum Survey Group
ESA	European Spatial Agency
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
GEF	Global Environment Facility
GLASOD	Global Assessment of Human-induced Soil Degradation
IRC	Infrarrojo cercano
LADA	Land Degradation Assessment in Drylands
LCS	Land Cover Status
MA	Millenium Ecosystem Assessment
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
MFE1000	Mapa Forestal de España a escala 1:1.000.000
MVC	Máximo Valor Compuesto
NUTS	Nomenclatura de Unidades Territoriales estadísticas
NVDI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
P	Precipitación
PAND	Programa de Acción Nacional contra la Desertificación
PET	Evapotranspiración Potencial
PPNE	Productividad Primaria Neta Epigea
RUE	Rainfall Use Efficiency (Eficiencia del uso de la lluvia)
SIEVD	Sistema Integrado de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación
SOC	Soil Organic Carbon
SPOT	Satelite para la exploración de la tierra
UNEP	United Nations Environmental Programme
UTM	Univresal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 84



Índice

1. Introducción	9
1.1. Antecedentes	10
1.2. Objetivos	11
2. Datos de partida	13
2.1. Serie temporal de NDVI	14
2.2. Archivo climático	14
2.3. Usos del suelo	15
2.4. Divisiones administrativas	15
2.5. Mapa Forestal de España	15
2.6. Mapa de Carbono Orgánico del Suelo en Europa	15
2.7. Período de estudio y sistemas de referencia	15
3. Metodología	17
3.1. Valoración de estados	17
3.2. Seguimiento de tendencias	20
3.3. Condición de la tierra	21
3.3.1. Estados	21
3.3.2. Tendencias	23
3.4. Relleno de áreas sin datos	23
3.4.1. El problema de los huecos en series temporales	23
3.4.2. Serie temporal de NDVI y huecos en 2dRUE	24
3.4.3. Solución técnica para maximizar la continuidad espacial de los mapas	25
3.5. Muestras usadas en resultados y análisis	26
4. Validación	27
4.1. Validación de las tendencias	27
4.2. Validación de los estados	27
4.2.1. Relaciones entre las distribuciones de frecuencias de estados de condición y niveles cuantitativos de SOC	28
4.2.2. Asociación entre grupos de estados de condición y el umbral SOC < 2%	30
4.2.3. Discusión y conclusiones	30

5. Interpretación	33
5.1. Asociación entre condición de la tierra y tipos de cubierta vegetal.	35
5.2. Asociación entre clases de condición y tipos de cubierta vegetal por comunidades autónomas.	36
5.3. Asociación entre clases de condición y tipos detallados (<i>Sobrecolor</i>) de cubierta vegetal por aplicaciones territoriales	39
5.3.1. España peninsular.	39
5.3.2. Baleares.	41
5.3.3. Canarias.	42
5.4. Discusión y conclusiones	47
6. Resultados	49
6.1. Continuidad de la serie temporal de NDVI	49
6.2. Dominio CNULD	51
6.3. Variación del RUE observado frente a la aridez	53
6.4. Condición de la tierra en España	55
6.4.1. Estados	56
6.4.2. Tendencias	57
6.4.3. Relaciones entre estados y tendencias.	59
7. Potencialidad de uso del mapa de condición de la tierra	61
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXO: CARTOGRAFÍA	65
ANEXO: DVD CARTOGRAFÍA DIGITAL	

1. Introducción

La Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (CNULD) considera la *evaluación y seguimiento de la desertificación* como una de las actividades fundamentales para su control. El Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), necesita contar con procedimientos de evaluación, seguimiento y alerta temprana de la desertificación.

Por lo tanto, el PAND propone el desarrollo de un Sistema Integrado de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación (SIEVD), cuyo principal objetivo es constituirse en un instrumento operativo de apoyo a la aplicación del Programa, a través de la determinación de zonas problemáticas en las que llevar a cabo las actuaciones preventivas y correctoras que correspondan, de acuerdo con la evaluación de la situación actual y las previsiones futuras que determine el Sistema.

La incorporación de este Sistema en el PAND fue uno de los resultados del proceso de revisión del diagnóstico de la desertificación, puesto en marcha por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, y se realizó contando con la colaboración de un grupo de expertos en diagnóstico y evaluación de la desertificación. Durante dicho proceso, se detectaron una serie de iniciativas y líneas de trabajo con una mayor potencialidad y viabilidad, entre ellas la que es objeto de esta publicación: el empleo de la teledetección en la evaluación y seguimiento de la desertificación.

La presente publicación recoge así los primeros resultados de la puesta en marcha del SIEVD, de acuerdo a los objetivos, características y elementos del sistema que se recogen en el PAND. Según el programa, el establecimiento y mantenimiento del sistema debe contar con *la participación activa de los grupos de investigación involucrados en la evaluación y seguimiento de la desertificación en España*. Este principio lógico de actuación ha sido satisfactoriamente cumplido en este caso mediante la colaboración con un equipo de científicos de la Estación Experimental de Zonas Áridas de la Agencia Estatal del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZA-CSIC).

El empleo de la teledetección en la evaluación y seguimiento de la desertificación, que se basa en la utilización de índices que reflejen la condición de la cubierta vegetal y en series largas de datos meteorológicos, es una de las líneas de trabajo que han adquirido una creciente relevancia en los últimos años. Como quedó de manifiesto en la novena reunión del Comité de Ciencia y Tecnología (CST), la CNULD le otorga especial atención, puesto que su utilización permite la observación de grandes superficies con costes asequibles. De hecho, la metodología que permite obtener el mapa de condición de la tierra está incluida entre las contempladas por el CST. España, como país Parte de la CNULD afectado por la desertificación está obligado a realizar el seguimiento del proceso y a informar sobre el mismo.

En los epígrafes siguientes se describe detalladamente el procedimiento de elaboración del Mapa de la Condición de la Tierra en España (2000-2010). La Metodología sirve para explicar este producto en particular, pero contiene consideraciones y reglas generales para apoyar eventuales aplicaciones a otros dominios o períodos. Se describen los procesos de validación del Mapa, para lo cual se aplican contrastes estadísticos. Se aporta también la interpretación y el análisis de resultados con el fin de orientar al lector en relación con el uso del Mapa.

En el Anejo de Cartografía se incluyen individualmente los mapas principales, sin perjuicio de que versiones reducidas de algunos de ellos aparezcan en las secciones apropiadas para ilustrar sus contenidos.

1.1. Antecedentes

La noción de condición de la tierra se refiere a la capacidad del suelo para sostener la productividad de su cubierta vegetal en relación con procesos climáticos y de uso del territorio que operan sobre ella. Esta definición es neutra e incluye tanto casos que evolucionan negativamente y que son referidos convencionalmente como degradación, como casos positivos asociados con una progresión de la cubierta vegetal hacia una mayor madurez.

La degradación de tierras es, sin embargo, un objetivo primario dentro de cualquier análisis de condición. De manera coherente con la definición anterior, la degradación se relaciona con un declive de la productividad de la vegetación asociado al empobrecimiento del suelo. Este problema tiene incidencia global y afecta especialmente a las zonas áridas del mundo, y su definición y caracterización es uno de los principales focos de actividad de la Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (CNULD).

Las estimaciones de degradación obtenidas hasta la fecha dependen altamente de la aproximación y métodos usados, reflejando la evolución de los paradigmas aplicados para definir la degradación de tierras. El primer intento de producir una valoración global tuvo lugar a finales del siglo pasado, mediante el *Global Assessment of Human-induced Soil Degradation* (GLASOD) (Oldeman et al., 1991). Se trataba de una valoración cualitativa, basada en gran medida en criterios expertos, que distinguía los principales procesos que causan degradación, como erosión hídrica y eólica, salinización de suelos y aguas, pérdida de Carbono Orgánico del Suelo (COS) y nutrientes, desestructuración del suelo, etc. La base de datos resultante fue usada para realizar el primer Atlas Mundial de Desertificación (UNEP, 1992), según el cual más del 70% de las zonas áridas del mundo estaban afectadas por este problema.

Posteriormente, el GLASOD fue actualizado a un nuevo proyecto mundial llamado *Land Degradation Assessment in Drylands* (LADA, 2006)¹, promovido por UNEP, GEF y FAO. Reteniendo las categorías y paradigmas de GLASOD, LADA realizó un avance al entregar resultados cuantitativos. Ello fue posible mediante la inclusión de agentes socio-económicos y la ampliación de su perspectiva al balance de carbono y la biodiversidad como componentes del sistema funcional de usos del suelo y su degradación.

Una tercera iniciativa con implicaciones para la valoración de la degradación de tierras fue el *Millennium Ecosystem Assessment* (MA), desarrollado entre 2001 y 2005. Su síntesis sobre desertificación (Adeel et al., 2005) evaluaba la desertificación basándose en cuestiones clave cuyas respuestas usaban exclusivamente información generada para el MA. Su mayor logro fue una representación coherente de las relaciones entre degradación de tierras, cambio global y pérdida de biodiversidad, incluyendo algunas indicaciones básicas para mejorar las aproximaciones sobre valoración y seguimiento mediante la inclusión del papel de la acción humana y la variabilidad climática. Es interesante observar que esta iniciativa fue mucho más conservadora en sus estimaciones sobre la incidencia mundial de la degradación de tierras, que estaría alrededor del 10%.

Los tres proyectos descritos más arriba muestran una tendencia histórica hacia mayor complejidad en las aproximaciones a la degradación de tierras. La cual va desde identificar efectos sobre el 'suelo' a incluir explícitamente la noción de 'tierras', y finalmente a tener en cuenta interacciones a nivel global entre desertificación, atmósfera, sistemas de uso y variaciones en biodiversidad. Esta tendencia ha sido respaldada en gran medida por la CNULD, cuya definición de desertificación se refiere a 'la degradación de tierras en áreas áridas, semiáridas y sub-húmedo secas resultante de varios factores, que incluyen variaciones climáticas y actividades humanas'.

A pesar de su sencillez, la definición anterior tiene la ventaja de orientar el desarrollo de métodos para la valoración y seguimiento de la desertificación, incluyendo una demarcación precisa de las áreas afectadas. El

1 En el epígrafe 8 se incluye un estudio sobre las posibilidades de aplicación en España del proyecto LADA.

resultado de la desertificación (no la causa, como a veces se sugiere) es la degradación de tierras, y sus factores son el clima y las actividades humanas. A su vez, la degradación de tierras es definida por la CNULD como una 'reducción o pérdida, en áreas áridas, semiáridas y sub-húmedo secas, de la productividad biológica o económica y de la complejidad de los cultivos de secano, regadíos, o pastos y bosques'.

Reteniendo el carácter holístico del concepto de degradación de tierras, este trabajo aplica una aproximación ecológica evolucionada a partir de la definición original de la CNULD, donde la condición de la tierra es clave en la interacción entre sistemas biofísicos y humanos en el proceso de desertificación. La degradación de tierras queda así acotada como un subconjunto particular del concepto más amplio de condición. La ventaja de este marco es que la degradación es valorada usando las mismas funciones ecológicas que otros estados del paisaje y puede sustraerse de los juicios de valor que normalmente acompañan su caracterización.

La aproximación desarrollada en este trabajo se encuadra en la necesidad actual de un método fiable de diagnóstico de condición de la tierra que pueda ser comparado de manera coherente con otras zonas áridas del mundo, y repetido en el tiempo. Dicha necesidad fue acometida recientemente por la CNULD mediante el Indicador de Impacto obligatorio sobre *Land Cover Status* (LCS: Estado de la Cobertura Terrestre). Este indicador forme parte del Objetivo Estratégico de CNULD para mejorar las condiciones de los ecosistemas, y tiene como objetivo 'vigilar la degradación de tierras en términos de pérdida a largo plazo de productividad ecológica y teniendo en cuenta los efectos de la precipitación sobre la Productividad Primaria Neta' (Orr, 2011).

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este mapa de condición de la tierra es dar una representación coherente de los ecosistemas terrestres, identificando estados y tendencias en términos de madurez ecológica, y con especial atención a la degradación de tierras. Su dominio espacial es el estado español, y su período de referencia es 2000-2010. Además, este mapa tiene dos objetivos asociados. Uno es servir como instrumento para diagnósticos detallados sobre los que basar políticas territoriales, especialmente las relacionadas con desertificación. Y el otro es servir como prototipo metodológico para aplicaciones en España para un período posterior, o bien, aplicaciones en países diferentes.

Para ello, este documento incluye explicaciones detalladas sobre la metodología seguida en la elaboración del mapa. También se ofrecen contrastes estadísticos para su interpretación y validación, de modo que el producto final tenga, respectivamente, claves para su uso y un control de calidad.

El usuario genérico de este tipo de resultados es una institución que que tenga competencias sobre el seguimiento del estado del recurso suelo y su protección a través de la elaboración y aplicación de políticas agrarias y medioambientales.

Un mapa de estas características corre el riesgo de ser sólido desde un punto de vista académico, y sin embargo de escasa utilidad práctica para usuarios como los descritos. Esta eventualidad ha sido evitada mediante la imposición de los siguientes requisitos:

1. Implementar explícitamente la definición de *Land Cover Status* dada por la CNULD.
2. Los paradigmas usados para evaluar la degradación de tierras deben estar basados en funciones ecológicas.
3. Los datos de entrada deben proceder de bases de datos normalizadas, públicas y disponibles.

4. Los protocolos deben separar claramente procesos computacionales objetivos de intervenciones puntuales donde se requiera un juicio experto.
5. Los resultados deben ser relevantes para la la evaluación de la degradación de tierras y la formulación de planes de prevención y, al mismo tiempo, susceptibles de interpretación ecológica.

Algunas definiciones pueden ser útiles para evitar ambigüedades en la comprensión de los términos utilizados en este trabajo. Para ello se aplican las siguientes definiciones del Diccionario de la Lengua Española:

- *Condición*: (def. 1) Índole, naturaleza o propiedad de las cosas.
- *Estado*: (def. 1) Situación en que se encuentra alguien o algo, y en especial cada uno de sus sucesivos modos de ser o estar.
- *Tendencia*: (def. 2) Fuerza por la cual un cuerpo se inclina hacia otro o hacia alguna cosa.
- *Valoración*: Acción o efecto de valorar (reconocer, estimar o apreciar el valor o mérito de alguien o algo).
- *Seguimiento*: Acción y efecto de seguir o seguirse (def. 7: observar atentamente el curso de un negocio o los movimientos de alguien o algo).

La noción de estado es central en este conjunto porque sugiere en sí misma tanto una posición concreta como la posibilidad de detectar su evolución mediante el cambio a estados sucesivos. Por tanto, nada del resto sería necesario excepto la necesidad de valorar periódicamente el estado de madurez o degradación. Sin embargo, esta solución simple choca con dos problemas. En primer lugar, es muy difícil y costoso establecer referencias absolutas para determinar el estado de degradación de tierras, en parte porque lo aparente son sus efectos, y en parte porque incluso variables elementales como la Producción Primaria Neta no suelen estar disponibles y requieren campañas específicas y caras. Y en segundo lugar, valoraciones sucesivas del estado de degradación serían comparables sólo si las condiciones de contorno permanecieran constantes. El clima es una condición de contorno para la degradación de tierras, y su variabilidad puede conducir a diferentes interpretaciones del estado incluso si las propiedades básicas de la tierra no cambian.

Los problemas anteriores pueden ser sorteados separando los estados de las tendencias, y aplicando respectivamente métodos para su valoración y seguimiento. En este estudio, la valoración se refiere a la estimación sincrónica del estado de degradación durante un período relativamente largo, usando referencias relativas que se detectan estadísticamente. Y el seguimiento se refiere a la observación diacrónica de tendencias dentro del mismo período. El período de tiempo debe tener, por tanto, la mayor longitud que permita la detección de estados y tendencias estables, y la mayor resolución temporal que permita la detección de cambios significativos en el rendimiento de la cubierta vegetal. En este caso, ese compromiso se ha alcanzado examinando una década (2000-2010) a resolución mensual.

2. Datos de partida

La metodología aplicada en este mapa de condición de la tierra se basa en series temporales archivadas de un índice de vegetación obtenido mediante teledetección, y campos climáticos correspondientes. Ambos tipos de series deben estar disponibles para el período completo a una resolución mensual. Además, requiere de algunos mapas que puedan asumirse como estables para todo el período analizado: usos del suelo, divisiones administrativas, vegetación natural y seminatural, y ciertas propiedades del suelo. No todos estos últimos son imprescindibles, pero ayudan significativamente al cómputo, interpretación y validación de los resultados, como se verá más adelante. Los datos concretos usados en este estudio se muestran resumidos en la Tabla 2.1 y se describen a continuación.

Tabla 2.1. Datos de partida usados para elaborar el Mapa de Condición de la Tierra en España (2000-2010).

Variable	Producto y fuente	URL
Archivo de Vegetación	<i>SPOT VEGETATION NDV S1</i> . Disponible desde 1998. Gestionado por VITO. Datos registrados cada diez días a la resolución espacial de 0.00892857° (aproximadamente 1 Km.). Canal de calidad disponible para eliminar nubes y nieves. Los datos mensuales fueron calculados seleccionando el máximo valor.	http://free.vgt.vito.be/
Archivos de Temperatura y Precipitación	<i>Interpolaciones ad-hoc</i> . Datos procedentes de la Agencia Estatal de Meteorología (ES) y el Sistema Nacional de Recursos Hídricos (PT).	http://snirh.pt/ http://lwf.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/res40.pl?page=gsod.html
Usos del Suelo	<i>Land Cover Corine 2006 version 13</i> , y <i>Land Cover Corine 2000-2006 changes version 13</i> . Gestionado por la Agencia Europea de Medio Ambiente. Ambas bases de datos en formato raster a 100 m de resolución y sistema ETRS-LAEA.	http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster
Carbono Orgánico en el Suelo	<i>Mapa del Carbono Orgánico en el Suelo en Europa</i> . Producido por el European Soil Bureau, Joint Research Centre. Capa raster a 1000 m de resolución en sistema ETRS-LAEA.	http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/octop/octop_data.html
Vegetación natural y seminatural	<i>Mapa Forestal de España MFE1000</i> . Síntesis a escala 1:1.000.000 en sistema UTM30-ED50. Capa vectorial. Producido y Gestionado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.	http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/mapa-forestal-de-espana/mfe_1000.aspx
Divisiones Administrativas	<i>Unidades administrativas (NUTS 1, 2 and 3)</i> . Gestionadas por Eurostat. Capa vectorial a escala 1:3.000.000, actualizada en 2006.	http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/geodata/reference

2.1. Serie temporal de NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) es proporcional a la cantidad de biomasa vegetal viva que hay en un sitio en un momento dado. Los valores para calcularlo se registran en un sensor remoto, normalmente instalado en un satélite, y consisten en las intensidades emitidas o reflejadas para dos bandas del espectro electro-magnético, el infrarrojo cercano (*IRC*) y el rojo (*R*):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - R}{\text{IRC} + R} \quad (1)$$

El razonamiento es que la vegetación viva produce una señal alta en el *IRC*, mientras que los objetos inertes la producen en el *R*. El formato de la expresión, dividiendo la diferencia por la suma, normaliza los resultados al intervalo -1 a 1, en el que la vegetación viva da señales proporcionales a la biomasa que son siempre positivas.

Existen varios productos disponibles, consistentes en series temporales de NDVI asociadas a sus sensores respectivos. Tras analizar las diversas series de datos que cumplían con los requerimientos de la metodología, se ha empleado para este trabajo el producto S10 derivado del sensor SPOT-Vegetation, el cual es de distribución gratuita a través de una compañía (VITO, 1998). Los datos se encuentran en coordenadas geodésicas a la resolución espacial de 0,00892857 grados (aproximadamente 992 m), y la serie comienza en abril de 1998. Una capa de estado asociada a cada imagen permite enmascarar los píxeles afectados por nubes o nieve.

El producto S10 consiste en síntesis globales de NDVI obtenidas cada diez días (*dekadas*). Cada síntesis resulta de combinar los datos de todas las medidas de vegetación de una *dekada* en una única imagen, mediante el algoritmo de Máximo Valor Compuesto (MVC), que selecciona los píxeles con mejor valor de reflectancia (Baret et al., 2006). En esta aplicación, cada imagen mensual fue construida en dos pasos. Primero, todos los píxeles con nubes o nieve de cada *dekada* fueron enmascarados. Y segundo, una única imagen fue ensamblada usando los valores máximos detectados en las tres *dekadas* correspondientes.

2.2. Archivo climático

La serie temporal de datos climáticos fue extraída de un archivo de campos mensuales de temperaturas máxima media, media y mínima media, y de precipitación total, generado para el período total 1970-2010. Este archivo está formado por mapas mensuales para esas cuatro variables a lo largo de todo el período, a la resolución espacial de 1000 m. Los mapas fueron interpolados a partir de resúmenes mensuales de estaciones meteorológicas georreferenciadas distribuidas por todo el territorio. Los datos fueron provistos por la Agencia Estatal de Meteorología

No se emplearon técnicas estadísticas para rellenar huecos en las series de datos. Los resúmenes mensuales fueron computados sólo para estaciones que tuviesen menos de cinco días sin datos para el mes correspondiente, y la interpolación de cualquier mes fue hecha usando sólo estaciones con resúmenes mensuales completos para el año correspondiente.

Las interpolaciones fueron realizadas usando el suavizado de placa delgada (*thin-plate smoothing*) implementado en ANUSPLIN (Hutchinson, 1995), una técnica aceptada para interpolar datos multivariantes con ruido como las variables climáticas, y que se compara favorablemente con otros métodos de interpolación (Jarvis and Stuart, 2001). Latitud, longitud y altitud fueron especificadas como covariantes durante el proceso de ajuste de las superficies. Los valores de temperatura se usaron directamente, pero los de precipitación fueron transformados mediante su raíz cuadrada para reducir el sesgo. La resolución más fina de las superficies fue de 3 minutos de arco, que posteriormente se registró a una malla de 1.000 m.

2.3. Usos del suelo

El programa CORINE (COoRdinate INformation on the Environment), gestionado por la Agencia Europea de Medio Ambiente proporciona información periódica sobre cobertura y uso del suelo a una escala espacial de 1:100,000. La edición correspondiente a 2006 del producto Land Cover (CLC versión 13; <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster>, acceso junio 2013) fue usada aquí.

2.4. Divisiones administrativas

Se usaron las unidades administrativas definidas por los niveles de Nomenclatura de Unidades Territoriales estadísticas (NUTS) 1, 2 y 3 para identificar respectivamente los límites nacionales, las comunidades autónomas, y las provincias del estado español. Estos datos son gestionados por Eurostat y consisten en capas vectoriales a escala 1:3,000,000. Se usó la actualización correspondiente a 2006 (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/geodata/reference, acceso junio 2013).

2.5. Mapa forestal de España

El Mapa Forestal de España a escala 1:1.000.000 (MFE1000) es una generalización del producto equivalente más detallado a escala 1:200.000, correspondiente al período 1986-1997. En él se describen las principales formaciones vegetales de España, con atención especial a la vegetación forestal. A pesar de las limitaciones de detalle impuestas por la generalización de la escala espacial, la versión MFE1000 (Ruiz de la Torre, 2002) equivale perfectamente a la resolución del Mapa de Condición de la Tierra presentado aquí, y fue seleccionado para su interpretación. El producto fue proporcionado por el Banco de Datos de la Naturaleza de la Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal del MAGRAMA. Pueden encontrarse detalles completos en http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/ecosistemas-y-conectividad/mapa-forestal-de-espana/mfe_1000.aspx.

2.6. Mapa de Carbono Orgánico del Suelo en Europa

Se ha usado el Mapa de Carbono Orgánico del Suelo en Europa. Se trata de una iniciativa del European Soil Bureau (Joint Research Centre, Comisión Europea) para producir una línea de base o nivel de referencia frente al que evaluar futuros cambios en el Carbono Orgánico del Suelo (COS). El mapa muestra la distribución de COS (%) en los primeros 30 cm del suelo en Europa, a una resolución de 1 km. Esos valores de COS han sido modelados mediante funciones de pedo-transferencia relativos al suelo, uso y clima, usando datos contenidos en la European Soil Database. El mapa puede obtenerse tras un registro previo en http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/octop/octop_data.html (acceso junio 2013).

2.7. Período de estudio y sistemas de referencias

La metodología aplicada usa años hidrológicos (Glickman, 2000) para incluir ciclos completos de precipitación y evapotranspiración. Así, el período de estudio abarca diez años hidrológicos, desde el 1 de septiembre de 2000 hasta el 31 de agosto de 2010. El número de meses fijado para la precipitación antecedente fue de seis. Las resoluciones temporales fueron de 1 mes para la valoración de estados y de 1 año para el seguimiento de tendencias.

Todos los mapas y datos de partida fueron re-proyectados al principio del estudio para coincidir con la serie temporal de NDVI, preservando así la integridad de estos valores y facilitando los cálculos en éste y posteriores estudios. Por tanto, el sistema de referencia de trabajo consiste en coordenadas geodésicas en el datum

WGS84 (código 4326 del European Petroleum Survey Group, EPSG). La resolución espacial se aproxima a 1 km de arco sobre un círculo máximo. Los productos finales fueron entonces transformados a sistemas de referencia proyectados según la zona.

Aunque se han manejado tres áreas de estudio de manera independiente (territorio peninsular, archipiélago balear y archipiélago canario), el Mapa de Condición de la Tierra en España sigue las especificaciones del Real Decreto 1071/2007. Para ello las tres áreas han sido agrupadas en dos lotes:

- El territorio peninsular y Baleares forman un lote único. Su sistema de referencia final consiste en proyección UTM Huso 30 en el sistema ETRS89 (código EPSG 25830).
- Canarias forma un lote diferente, con sistema de referencia final en proyección UTM Huso 28 en el sistema REGCAN95 (código EPSG 4083).

Puede apreciarse que, en ambos lotes, las coordenadas proyectadas se han transformado a un solo Huso UTM (30 para península y Baleares, 28 para Canarias) con objeto de mantener el territorio correspondiente en una única capa.

Las imágenes en coordenadas geodésicas prevalecen en todos los casos si se detecta una inconsistencia con los datos proyectados correspondientes.

3. Metodología

El procedimiento de elaboración del mapa de condición de la tierra, denominado *2dRUE*, implica componentes separados de valoración y seguimiento que operan sobre el mismo juego de datos. La valoración se refiere al estado de degradación y trata de cuantificar el rendimiento ecológico de cada sitio respecto a sus condiciones potenciales de referencia. Por tanto, cada sitio es comparado sincrónicamente con todos los demás durante el período de análisis. Por otra parte, el seguimiento se refiere a las tendencias y pretende detectar la evolución de cada sitio en el curso del tiempo, tanto a causa de oscilaciones climáticas como por su dinámica ecológica interna. Aquí, cada sitio es comparado consigo mismo a lo largo del período. Los estados y las tendencias convergen entonces a un mapa final de condición mediante la aplicación de reglas explícitas que relacionan las clases respectivas.

Los métodos descritos en esta sección fueron publicados por primera vez en (del Barrio et al., 2010), publicación en la que se describe una primera ejecución de *2dRUE* para la Península Ibérica, referida al período 1989-2000. Sin embargo, el mapa presentado aquí incorpora varias mejoras, por lo que la comparación directa entre ambos mapas, si bien es posible, no es inmediata, requeriría un post-proceso del estudio precedente, lo cual se encuentra fuera del ámbito de este trabajo. Otras aplicaciones recientes de *2dRUE* han sido hechas en el marco del proyecto *ESA-DesertWatch Extension*, y pueden consultarse en <http://www.desertwatch.info/> (acceso junio 2013).

Además, las funciones de proceso de datos han sido codificadas en el lenguaje de computación estadística R, y reunidas en una librería de software llamada *r2dRue* (Ruiz et al., 2011). *r2dRue* es abierta y gratuita y puede descargarse de cualquier servidor de R (<http://cran.r-project.org/web/packages/r2dRue/index.html>, acceso junio 2013).

3.1. Valoración de estados

La Productividad Primaria Neta Epigea (PPNE) se define como la tasa de cambio de la biomasa vegetal por unidad de tiempo, excluyendo las raíces y órganos subterráneos. Medida sobre un intervalo de tiempo relativamente largo (por ejemplo, un año), y comparando secuencialmente los valores, se aproxima a lo que convencionalmente se denomina producción, en la que se descuentan las pérdidas por mortalidad durante el período. Su declive respecto a la de tierras no desertificadas bajo condiciones climáticas equivalentes es proporcional al proceso de degradación. Esta percepción está estrechamente relacionada con la definición de degradación dada por CNULD.

Dos atributos ecológicos son relevantes para establecer el estado de la vegetación: la biomasa media anual, y los picos de productividad estacional o interanual. El primero señala la capacidad del ecosistema para sostener y producir biomasa a largo plazo, y puede relacionarse con su madurez. El segundo se refiere a su resiliencia para recuperarse de perturbaciones, especialmente fluctuaciones de precipitación (Pickup, 1996)).

El problema de usar directamente biomasa o PPNE como estimadores del estado de un ecosistema árido es su alta dependencia de la precipitación, que impide cualquier comparación espacial o temporal y propenden a

dar respuestas efímeras. Ello motivó la definición de la Eficiencia en el Uso de la Lluvia (RUE) como la razón de la PPNE y la precipitación (P) durante un período dado (LeHouerou, 1984), la cual puede ser interpretada como la cantidad de biomasa vegetal producida por unidad de precipitación durante ese período. El RUE es una función adecuada para describir el estado de un ecosistema árido porque sólo puede dar valores altos si el suelo permanece completamente funcional, especialmente en su capacidad para regular el aporte de agua entre eventos lluviosos. Adicionalmente, un RUE elevado implica que la mayor parte del agua recibida se pierde verticalmente hacia la atmósfera en vez de horizontalmente por escorrentía.

Un índice de vegetación como el NDVI es un estimador plausible de la biomasa, y su integración durante un período de tiempo lo es de la PPNE (Tucker, 1979; Tucker et al., 1986), siempre que se refiera a lapsos de tiempo de crecimiento relativamente cortos para evitar senescencias estivales u otoñales. El uso del RUE para valorar estados de degradación mediante aproximaciones geomáticas es común desde que fue aplicado por primera vez en el Sahel (Prince et al., 1998), y hay ejemplos recientes que lo han empleado en el Sahel (Hein and de Ridder, 2006; Prince et al., 2007), Patagonia (Garbulsky and Paruelo, 2004; Jobbagy et al., 2002) o Mongolia Interior (Bai et al., 2008), por citar algunos. De hecho, el RUE se considera una métrica madura para el indicador de impacto de la CNULD *Land Cover Status* (LCS) (Orr, 2011).

Sin embargo, la aplicación directa del RUE presenta algunas limitaciones que deben ser atendidas antes de poder usarlo como indicador para grandes territorios. $2dRUE$ refina la mayoría de esos problemas de la forma explicada a continuación.

La formulación del RUE como un cociente implica que puede alcanzar valores elevados si la precipitación es baja, incluso si la vegetación permanece constante. Si es aplicado a un territorio grande con gradientes climáticos contrastados, como es la Península Ibérica, las zonas que reciben menos lluvia alcanzan sistemáticamente valores muy altos de RUE, lo que impide la comparación de sitios a través del espacio. Para corregirlo, los valores de RUE son representados frente a un índice de aridez (AI) simple, que se calcula como la razón de la Evapotranspiración Potencial (PET) y la P. Esta formulación usa las mismas variables que la de UNEP (UNEP, 1992), pero los términos invertidos amplían la escala numérica de las zonas áridas y además es ligeramente más intuitiva. A la escala de un estudio como este, PET puede ser estimada a partir de las temperaturas del archivo climático, y la radiación solar extraterrestre (Hargreaves and Samani, 1982).

La gráfica de RUE sobre AI sólo puede ser significativa si incluye únicamente sitios que reciben agua mediante P, y no de otras fuentes como por ejemplo sucede con los regadíos. Por ello, dicha gráfica fue construida seleccionando las siguientes categorías de mapa de usos y coberturas CLC: bosques de coníferas, bosques mixtos, pastos naturales, brezales, vegetación esclerófila, transiciones bosque-matorral, playas, dunas, roca desnuda, áreas de vegetación dispersa, áreas quemadas, y glaciares y nieves perpetuas.

Los límites superior e inferior de esa gráfica se relacionan respectivamente con el máximo y mínimo rendimiento que cabe esperar de la vegetación para un nivel de aridez dado. Eso es ya un primer paso para la corrección climática del RUE. En este estudio, dichos límites fueron computados identificando, en primer lugar, clases de AI según deciles (no intervalos regulares, debido al sesgo de su distribución de frecuencias), y después, extrayendo los percentiles 95% y 5% de RUE para cada una de esas clases de AI. Ello permitió disponer de pares de puntos (AI, RUE) con los que realizar un ajuste estadístico de las funciones envolventes correspondientes al máximo (95%) y mínimo (5%) rendimiento referido más arriba. Para ello fue seleccionado el modelo de función que maximizase la significación del ajuste, que fuese lo más sencillo posible, y que respetase la tendencia general aparente del RUE sobre AI. Las funciones envolventes fueron finalmente modeladas espacialmente usando la capa de AI como variable independiente, lo que condujo a obtener dos capas adicionales correspondientes al máximo y mínimo rendimiento potencial de la vegetación.

Con esos nuevos datos, puede calcularse un RUE relativo (rRUE) que muestra la posición del RUE observado en cada sitio respecto a sus potenciales máximo y mínimo determinados empíricamente. Sus valores teóricos deben estar en el intervalo 0-1, pero en la práctica el uso de percentiles hace que una pequeña cantidad exceda

el intervalo por arriba o por debajo. A diferencia de las funciones envolventes, rRUE es modelado para todo el territorio, lo que es útil para detectar anomalías zonales. Por ejemplo, la cantidad relativamente alta de biomasa que suelen tener los regadíos respecto al clima en que se encuentran, los hace aparecer de esta forma.

El rRUE tiene dos propiedades importantes. La primera es incorporar una corrección climática completa, lo que permite comparar sitios situados bajo climas diferentes. Y segundo, las funciones envolventes definen referencias naturales frente a las que comparar el rendimiento de la vegetación de cualquier sitio, cualquiera que sea su cubierta vegetal. Es decir, rRUE también está corregido respecto al uso del suelo asumiendo el paradigma de que la vegetación natural no alterada y sus procesos ecológicos subyacentes tienen un rendimiento óptimo. Por todo ello, el rRUE facilita comparaciones directas entre sitios cualquiera que sea su clima dominante y uso del suelo.

El período sobre el que el RUE es computado define la respuesta ecológica que se detecta. Un RUE a largo plazo, calculado sobre promedios anuales, refleja biomasa y puede ser asimilado a madurez ecológica. Sin embargo, un RUE a corto plazo, calculado para tener en cuenta únicamente la precipitación antecedente, refleja más bien la capacidad de respuesta inmediata y puede interpretarse en términos de productividad o resiliencia. Por ello, 2dRUE aplica dos implementaciones. En la primera se calcula un RUE observado medio (RUE_{OBS_me}) para todo el período (10 años hidrológicos en este caso), promediando los RUE observados anuales. Así, para el mes i en el año j :

$$RUE_{OBS_me} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{\frac{1}{12} \cdot \left(\sum_{i=1}^{12} NDVI_{j,i} \right)}{\sum_{i=1}^{12} P_{j,i}} \right) \tag{2}$$

El índice de aridez medio (AI_{OBS_me}) se calcula de forma equivalente como:

$$AI_{OBS_me} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} PET_{j,i}}{\sum_{i=1}^{12} P_{j,i}} \right) \tag{3}$$

En la segunda implementación se calcula un RUE observado extremo (RUE_{OBS_ex}) válido para el período completo. En este caso se usa el máximo valor de NDVI de toda la serie temporal (\overline{NDVI}_t), y se divide por la precipitación total recibida en los 6 meses antecedentes al mes t en que dicho máximo es detectado:

$$RUE_{OBS_ex} = \frac{NDVI_t}{\sum_{i=1}^6 P_{t-i}} \tag{4}$$

De nuevo, un índice de aridez (AI_{OBS_ex}) es calculado para ese período particular:

$$AI_{OBS_ex} = \frac{\sum_{i=1}^6 PET_{t-i}}{\sum_{i=1}^6 P_{t-i}} \tag{5}$$

El resultado de ambas implementaciones es tratado entonces como RUE observado en el proceso de corrección climática descrito más arriba, para ajustar sus funciones envolventes y RUE relativos respectivos ($rRUE_{me}$ y $rRUE_{ex}$). Por ejemplo,

$$rRUE_{me} = \frac{RUE_{OBS_me} - RUE_{EXP_me_P05}}{RUE_{EXP_me_P95} - RUE_{EXP_me_P05}} \quad (6)$$

Donde los subíndices P_{05} y P_{95} se refieren respectivamente a las funciones envolventes ajustadas para cada percentil, y que definen el RUE potencial de cada sitio (subíndice EXP).

3.2. Seguimiento de tendencias

Los cambios en la biomasa vegetal a lo largo del tiempo son un indicador aceptado de tendencias en la condición de la tierra. Un declive gradual de la biomasa se interpreta como degradación activa, y recíprocamente un aumento puede interpretarse como mejora o evolución. Es importante aclarar que esto se refiere a las tasas de cambio que reflejan procesos activos, y no a los niveles de estado que han sido explicados en la sección precedente.

El RUE no puede ser usado para seguimiento debido a que la precipitación sería parte del cálculo y factor de cambio (debido a su variabilidad interanual) al mismo tiempo. Por tanto, en este caso se usan promedios anuales de NDVI como estimadores de la biomasa pura (Hein and de Ridder, 2006).

En el esquema simplificado que se asocia con la resolución de este estudio, las tendencias de cambio en la biomasa pueden ser asociadas a dos factores: el clima y la dinámica ecológica interna. El primero causa fluctuaciones de biomasa relacionadas con la variabilidad de la aridez y las precipitaciones. El segundo factor, sin embargo, se asocia con una sucesión o regresión ecológica, y por ello es el único relevante a efectos de condición de la tierra. Por tanto, todo seguimiento de la biomasa a lo largo de un período suficientemente largo debe tener en cuenta los efectos de la variabilidad climática para poder detectar adecuadamente el cambio en la organización de los ecosistemas en cuestión. No hacerlo así podría resultar, por ejemplo, en interpretaciones erróneas hechas sobre ecosistemas vigorosos que simplemente ralentizan su crecimiento en años de precipitación escasa.

$2dRUE$ aplica una regresión múltiple paso a paso para aislar los efectos respectivos del clima y del paso del tiempo sobre la biomasa de cada sitio. En este estudio, dicha regresión usó 10 puntos correspondientes a los años del período. Cada punto estuvo formado por el promedio anual de NDVI como variable dependiente, y el índice de aridez, junto con el número de orden de ese año en la secuencia del período, como predictores.

El propósito de este análisis es detectar las contribuciones parciales de ambos predictores para crear tendencias significativas en la biomasa, no realizar predicciones de esta última basada en valores de aquellos. Por esta razón, las regresiones se llevan a cabo en modo estandarizado, donde los coeficientes de regresión parciales se expresan en unidades de desviación típica y no en sus unidades originales (se suele llamar coeficientes beta a esta modalidad). Ello permite una comparación directa de la fuerza relativa que tienen el clima y el curso del tiempo para imprimir un cambio de una desviación típica en el NDVI. Todos los procedimientos siguen las formulaciones de (Sokal and Rohlf, 1995).

Es común que la aridez cambie significativamente en el curso del tiempo a lo largo de un período de diez años. En un caso así, la correlación entre predictores hace que la significación total de una regresión múltiple no sea indicativa de sus efectos individuales respectivos. Por tanto, el modelo de regresión sólo debe incorporar la segunda variable si esta produce un incremento adicional y significativo de determinación. Con objeto de cumplir este requisito, se calculó en primer lugar el coeficiente de determinación múltiple ($R^2_{NDVI,1,2}$), usando tanto el tiempo como la aridez como predictores, y su significación fue contrastada para un umbral de $\alpha=0.10$.

Si era significativo, se asignaba como segunda variable en el modelo de regresión aquella cuyo coeficiente de correlación simple con el NDVI fuese menor (r_{NDVI_2}). Entonces se evaluaba el incremento de determinación debido a esta variable respecto a la determinación de un modelo que usase sólo la primera variable. Para ello se comparaba el estadístico observado F_s :

$$F_s = \frac{R_{NDVI_{1,2}}^2 - r_{NDVI_2}^2}{(1 - R_{NDVI_{1,2}}^2)/(n-3)} \quad (7)$$

con el valor esperado en la distribución de F a un umbral de significación de $\alpha = 0.10$ para 1 y $n-3$ grados de libertad ($F_{\alpha=0.10[1, n-3]}$), donde n es el número de puntos (10 en este estudio). Todos los parámetros mencionados son proporcionados por los programas estadísticos más comunes y no serán descritos aquí.

Si F_s resultaba significativo, se aceptaba la regresión múltiple y los coeficientes de regresión parcial estandarizados del tiempo y la aridez eran usados para cuantificar sus efectos respectivos de la vegetación. Si no, se exploraban regresiones simples para cada variable mediante la significación de sus coeficientes de correlación respectivos para $\alpha=0.10$. En estos casos, el coeficiente de correlación es equivalente al coeficiente estandarizado de regresión parcial porque es, por definición, la pendiente de una regresión en unidades de desviación típica. Si no se detectaba significación en ninguno de los contrastes anteriores, el NDVI era considerado como no afectado por el tiempo ni por la aridez.

3.3. Condición de la tierra

Los procedimientos de valoración y seguimiento descritos en las secciones precedentes rinden cuatro mapas cuantitativos que reflejan sendas componentes de la condición de la tierra:

- biomasa relativa ($rRUE_{me}$): refleja la respuesta de la vegetación a la lluvia a largo plazo;
- productividad relativa ($rRUE_{ex}$): refleja la respuesta de la vegetación a la lluvia a corto plazo;
- tasa de cambio de la biomasa según la variabilidad interanual de la aridez y
- tasa de cambio de la biomasa según el tiempo (éstos, en términos de los respectivos coeficientes estandarizados de regresión parcial o coeficientes de correlación simple).

Dichas componentes son productos primarios que pueden ser usados como información ecológica básica.

Más allá de eso, es necesario adquirir una comprensión de mayor nivel de abstracción sobre la condición de la tierra en el área, que integre la información elemental anterior y al mismo tiempo pueda ser aplicada por un usuario no especializado. Ello implica definir separadamente estados a partir de los resultados de la valoración, y tendencias a partir de los del seguimiento, y posteriormente combinarlos en el mapa final de condición de la tierra.

3.3.1. Estados

La sucesión ecológica natural y la explotación humana implican evoluciones contrarias en la dinámica de los ecosistemas. La primera tiende a saturar el espacio disponible, y es productiva en estados iniciales, que conducen inevitablemente a ecosistemas poco productivos y con gran cantidad de biomasa acumulada en sus

estados finales. El ser humano actual no podría vivir de estos ecosistemas prístinos. Por ello, la mayoría de sus intervenciones en el paisaje consisten en simplificarlo, para mantenerlo en estados intermedios de la sucesión y aprovechar así la productividad primaria neta incrementada. Esta explotación puede conservar niveles variables de la biomasa natural del sistema, y en casos extremos hacerla desaparecer con objeto de concentrar la productividad en ciertas especies de interés.

La explicación anterior, muy simplificada, puede servir de marco al problema de la degradación de tierras. Según la definición de CNULD, ésta sobrevendría cuando un ecosistema explotado pierde gradualmente su productividad. En un gradiente de degradación de tierras, la biomasa decrece monótonamente, pero la productividad experimenta un pico en estados intermedios de degradación (Pickup et al., 1994, 1998). Las dos implementaciones de RUE a largo y corto plazo reflejan respectivamente esas funciones, y pueden ser usadas para identificar los estados de condición de la tierra en un marco ecológico como el descrito más arriba. Para ello se siguieron los siguientes pasos (ver también Figura 6.3 para mayor claridad):

1. Se ajustaron funciones de contorno siguiendo el procedimiento descrito para la valoración. Los percentiles 5% y 95% de RUE observado fueron usados para delimitar las gráficas. Se calcularon $rRUE_{me}$ y $rRUE_{ex}$.
2. Se calcularon los intervalos de confianza ($\alpha=0,05$) de ambas funciones de contorno correspondientes a $RUE_{OBS_{me}}$. La representación de esos intervalos dio lugar a cinco zonas en la gráfica de $RUE_{OBS_{me}}$ sobre $AI_{OBS_{me}}$ que fueron usadas para identificar una leyenda básica de estados:
 - a. **Anomalía de bajo rendimiento.** Vegetación bajo el intervalo de confianza del RUE mínimo esperado.
 - b. **Rendimiento basal.** Vegetación dentro del intervalo de confianza del RUE mínimo esperado.
 - c. **Rango.** Vegetación comprendida entre los intervalos de confianza de los RUE mínimo y máximo esperado. Clase para ser procesada adicionalmente.
 - d. **Rendimiento de referencia.** Vegetación dentro del intervalo de confianza del RUE máximo esperado.
 - e. **Anomalía de alto rendimiento.** Vegetación sobre el intervalo de confianza del RUE máximo esperado.
3. Cada sitio fue asignado a una de las clases anteriores comparando su $RUE_{OBS_{me}}$ con los límites de los intervalos de confianza de las funciones de contorno, a su vez modelados usando $AI_{OBS_{me}}$ como predictor en dichas funciones.
4. La clase **Rango** fue subdividida según sus valores de RUE relativo en ambas implementaciones. Para ello, todos los sitios dentro de esta clase fueron clasificados según estuvieran por encima o por debajo de las medianas de $rRUE_{me}$ y $rRUE_{ex}$. Los atributos resultantes fueron cruzados para distinguir las siguientes subclases:
 - a. **Degradado.** $rRUE_{me}$ y $rRUE_{ex}$ por debajo de las medianas respectivas. Vegetación con baja biomasa y baja productividad.
 - b. **Productivo con baja biomasa.** $rRUE_{me}$ bajo su mediana y $rRUE_{ex}$ sobre su mediana. Vegetación con baja biomasa y alta productividad.
 - c. **Productivo con alta biomasa.** $rRUE_{me}$ y $rRUE_{ex}$ por encima de sus medianas respectivas. Vegetación con alta biomasa y alta productividad.
 - d. **Maduro.** $rRUE_{me}$ por encima de su mediana y $rRUE_{ex}$ bajo su mediana. Vegetación con alta biomasa y baja productividad.

Este sistema implica esencialmente una discriminación en dos pasos. Primero, los sitios son clasificados objetivamente de acuerdo con su rendimiento a largo plazo, usando umbrales de significación estadística. En esa clasificación, las clases marginales (*Rendimiento basal* y *Rendimiento de referencia*) son pequeñas y su significado ya ha sido discutido. Sin embargo, la clase central (*Rango*) contiene todavía la mayoría de los sitios a causa del uso que se hace de las funciones de contorno. Por ello, el segundo paso se ejecuta sobre esta clase.

La clase *Rango* contiene, de hecho, la mayoría de los sitios sometidos a algún tipo de uso o explotación. No se encuentran en estados extremos, y cabe esperar diferentes respuestas ecológicas de su vegetación y suelo. Por ello, un gradiente unidimensional probablemente no captaría bien esas respuestas, y ambas implementaciones de RUE son usadas para ello.

3.3.2. Tendencias

Los efectos de la variación interanual de aridez y los causados por el tiempo son explícitamente separados en el procedimiento de seguimiento de tendencias. Los primeros se refieren a resiliencia frente a una precipitación impredecible. Por ejemplo, cuanto más húmedo venga el año mayor será la producción de biomasa. Una vez que tales efectos son aislados, la acumulación o pérdida de biomasa a lo largo del período indica auto-organización ecológica o degradación activa.

El resultado primario del seguimiento son dos mapas de coeficientes estandarizados de regresión parcial, y por tanto sus signos pueden ser interpretados. En el caso de la aridez, valores negativos indican simplemente que la vegetación aparece menos frondosa en años secos, mientras que valores positivos suelen indicar un beneficio de años cálidos (por la forma de calcular PET, que usa las temperaturas) para la vegetación en zonas no especialmente limitadas por el agua.

En el caso del tiempo, valores positivos reflejan una acumulación lineal de biomasa, por ejemplo una sucesión ecológica secundaria tras el abandono de la tierra, mientras que valores negativos indicarían la operación de algún proceso de degradación, sea lento (por ejemplo, sobrepastoreo) o abrupto (por ejemplo, un incendio al final del período).

La combinación de tres categorías (+/-/0) por dos mapas (aridez/tiempo) daría lugar a nueve combinaciones de leyenda, cuya interpretación podría ser útil localmente pero innecesariamente complicada para un territorio grande. Por ello, las tendencias fueron simplificadas de la siguiente forma para reflejar sólo atributos relevantes para la condición de la tierra:

- a. *Aumentando*. Acumulación de biomasa significativa a lo largo del período, cualquiera que sea la respuesta a variaciones interanuales de aridez.
- b. *Fluctuando*. La biomasa oscila según la aridez del año, pero sin variación significativa a largo plazo.
- c. *Degradándose*. Pérdida de biomasa significativa a lo largo del período, cualquiera que sea la respuesta a variaciones interanuales de aridez.
- d. *Estática*. Sin tendencia significativa, ni frente a variaciones interanuales de aridez, ni en curso del tiempo.

3.4. Relleno de áreas sin datos

Con la metodología descrita se elaboró una versión preliminar del mapa de condición de la tierra en el que se percibió un problema que es abordado en esta sección: los huecos en los mapas. Los datos originales del mapa de condición de la tierra tienen su origen en la teledetección, y como tales presentan zonas sin datos válidos por una variedad de razones (nubes, etc.). La propagación de dichos huecos en la serie temporal conduce a zonas en blanco en los mapas finales. Esas zonas podrían ser aceptables desde un punto de vista académico, pero no para un gestor cuya función es obtener y usar información continua sobre una demarcación administrativa completa, por lo que se consideró necesario buscar una solución. Se describen a continuación el problema y la solución propuesta.

3.4.1. El problema de los huecos en series temporales

Cualquier imagen terrestre detectada por un sensor remoto tiene una probabilidad de contener zonas anómalas que no se registren adecuadamente. La causa más frecuente es atmosférica, por ejemplo asociada a nubes,

pero también puede estar en superficie si ésta adquiere propiedades inútiles para el objetivo perseguido. Por ejemplo, la nieve puede cubrir vegetación, y por ello producir alteraciones en la detección de la cantidad de biomasa vegetal.

Los huecos así generados deben ser identificados, y su tratamiento posterior debe ser definido para evitar distorsiones en el producto final. El tratamiento más frecuente y seguro consiste en enmascararlos y excluirlos del proceso, y por ello se considera normal que los mapas procedentes de teledetección contengan zonas sin datos. La incidencia de esta solución en el producto final es variable. Si el objetivo es detectar tipos de cobertura terrestre, como es el caso del CORINE Land Cover (EEA, 2007), una sucesión apropiada de imágenes permite compensar y minimizar los huecos, rindiendo mapas prácticamente continuos con tal de que no ocurran cambios durante el período de observación. Si, por el contrario, el objetivo es cuantificar regularmente valores asociados a un período temporal definido, cualquier hueco puede distorsionar el cómputo del píxel o píxeles afectados. En este caso lo más prudente es enmascarar y excluir del producto final dichos píxeles. Especialmente si, como en el caso del procedimiento para definir las funciones envolventes en *2dRUE*, toda la población de píxeles del territorio debe contribuir a fijar cierta propiedad estadística del producto final.

La solución de enmascarar píxeles suele ser aceptable cuando el objetivo es detectar muestras representativas de un proceso o estructura. Sin embargo, no lo es tanto cuando se trata de informar comprensivamente de la totalidad de un territorio. El mapa de condición de la tierra objeto de este trabajo se encuentra en el segundo caso, ya que será usado por gestores para informar y decidir sobre entidades administrativas completas. Por ello, tras explorar varias soluciones técnicas, se ha aplicado la descrita a continuación.

3.4.2. Serie temporal de NDVI y huecos en *2dRUE*

El período de estudio en este trabajo es de diez años hidrológicos. Cada año se construye a resolución mensual. Por tanto, en principio se requieren 120 imágenes mensuales de NDVI para que un píxel forme parte del producto. Si el satélite ha tenido problemas durante parte del período, el hueco es sincrónico para todo el territorio y puede ser suficiente con excluir los años hidrológicos correspondientes, tal como se hizo en la aplicación ibérica precedente (del Barrio et al., 2010). Sin embargo, si los problemas están en los píxeles, por nubes o nieve, no existirá sincronía alguna y la exclusión se practica sobre los píxeles afectados.

Recuérdese que el producto usado para esta aplicación de *2dRUE* es la serie temporal de NDVI registrada por el sensor SPOT VEGETATION y distribuida por VITO (VITO, 1998). La resolución temporal original de dicha serie es de diez días, llamados una *dekada*, y cada imagen de NDVI tiene asociada otra imagen, llamada canal de calidad, que identifica los píxeles sin datos debido a nubes o nieve.

Para generar los datos mensuales necesarios para este proyecto, las tres *dekadas* de cada mes han sido combinadas en una sola imagen compuesta, que recoge para cada píxel el valor NDVI máximo de los hasta tres valores disponibles. Ello permite compensar las *dekadas* entre sí y minimizar la cantidad de huecos finales. Sin embargo, los píxeles que presenten nubes o nieve durante las tres *dekadas* correspondientes a un mes, quedan sin valor NDVI para dicho mes, y son enmascarados. La serie temporal final usada para aplicar el *2dRUE* contiene exclusivamente píxeles que tienen valores para cada uno de los 120 meses. Esa aproximación es técnicamente sólida porque usa todos los valores requeridos. Esto es crítico sobre todo para el procedimiento de valoración de estados, ya que en él, el valor de cada píxel depende tanto de su propia serie de valores como de unos estándares potenciales que se determinan usando todos los demás píxeles comparables. Por ello, el uso de píxeles con valores erróneos puede distorsionar el conjunto del mapa y no sólo dichos píxeles.

La versión preliminar del mapa de condición de la tierra (con huecos) fue entonces, por un lado, usada para los cálculos estadísticos asociados a la interpretación y validación del mapa, para asegurar la integridad de los datos. Y por otro, sometida a la solución técnica descrita a continuación para generar un producto espacialmente continuo del que puedan derivarse consultas con un control de fiabilidad.

3.4.3. Solución técnica para maximizar la continuidad espacial de los mapas

La solución aplicada consiste en:

Determinación de estados (valoración):

- i) Realizar los cálculos estadísticos usando sólo píxeles que tengan la serie temporal completa. Esto corresponde a la ejecución preliminar descrita más arriba.
- ii) Calcular un RUE ajustado en función de los datos disponibles de NDVI. El RUE se define como la razón anual de la producción primaria neta (aquí, el sumatorio de 12 NDVI mensuales) a la precipitación total (aquí, el sumatorio de 12 precipitaciones mensuales). Los datos de precipitación no tienen huecos, por lo que realizar el cálculo usando menos de 12 valores de NDVI conduciría a subestimar excesivamente el RUE. El ajuste consiste en usar sólo valores de precipitación para aquellos meses en los que hay valor de NDVI. Obviamente, los píxeles correspondientes al paso i) no requieren ajuste alguno.
- iii) Someter todos los píxeles (con su valor ajustado) a los cálculos descritos en el paso i). Es decir, calcular el RUE relativo de todos los píxeles usando funciones de referencia que han sido determinadas a partir de la sub-población de píxeles que tienen datos completos.

Determinación de tendencias (seguimiento):

- iv) El uso de NDVI medio correspondiente a cada año hidrológico, originalmente implementado en *2dRUE*, asegura que los datos sean comparables entre años. El ajuste descrito entre los datos disponibles de NDVI, y los correspondientes de precipitación y aridez, asegura coherencia en el resultado.

Determinación de la fiabilidad de la aplicación:

- v) Generar una imagen que muestre el número de meses en la serie temporal para los que cada pixel tiene valor NDVI. Para ello se suman máscaras binarias mensuales que identifiquen con 1 todos los píxeles que contienen valor NDVI. La suma de todas las máscaras de la serie indica con cuantos valores se ha trabajado en cada pixel. El resultado es una medida de fiabilidad (f) y se expresa como porcentaje, es decir, dividido por el número total de meses (120) y multiplicado por 100. Esta imagen acompaña al mapa de condición.

La solución descrita tiene algunas ventajas:

- Se valora individualmente la fiabilidad de cada pixel, lo que permite al usuario disponer simultáneamente de un mapa completo y de un criterio objetivo para estimar la confianza que puede tener en cada sitio del mapa.
- Los sesgos asociados a los errores en que puede incurrir son predecibles. Por ejemplo en latitudes templadas, los huecos asociados a nubes o nieve tienden a ocurrir en la época fría, cuando la vegetación está poco activa y la precipitación es alta. Por ello, donde falten datos de NDVI,
 - el RUE observado medio puede sobreestimarse al extender para un año valores correspondientes a la estación vegetativa, con alto NDVI y baja precipitación;
 - el RUE observado extremo puede subestimarse si el máximo NDVI de la serie se produjo en un mes con hueco;
 - como resultado de los puntos anteriores, cabe esperar que una fiabilidad baja implique la asignación de un estado de condición ligeramente superior al existente realmente (mayor biomasa, menor producción);
 - los errores en las tendencias dependerán de la continuidad de los huecos en el tiempo: huecos puntuales pueden dar un sesgo positivo a la tendencia, mientras que huecos interanuales reiterados no tendrán demasiado efecto.
- La fiabilidad dependiente de nubes o nieve tenderá a ser baja principalmente en áreas húmedas o de montaña, muchas de las cuales se encuentran en clases de aridez que las excluyen del dominio climático de áreas afectadas por desertificación según CNUCLD.
- De manera complementaria al punto anterior, esta solución maximiza la incorporación de píxeles en áreas afectadas por desertificación, sin comprometer el marco general del análisis.

3.5. Muestras usadas en resultados y análisis

Todos los procedimientos fueron aplicados en tres lotes para respetar las particularidades territoriales de España peninsular, las islas Baleares y las Islas Canarias. Cuando se consideró necesario, el nivel de análisis fue el de comunidad autónoma. Ceuta y Melilla no son, por su naturaleza, objetivo para un producto como este, y no fueron incluidas.

Los huecos en los mapas finales de las tres aplicaciones fueron cubiertos según el método descrito en la Sección anterior, y tienen una fiabilidad condicionada por la continuidad de las series temporales. Estos mapas se han usado para elaborar todos los resultados que informan de extensiones territoriales en kilómetros cuadrados.

Sin embargo, los resultados que aplican contrastes estadísticos proceden de las versiones restringidas de los mapas correspondientes, en las cuales los píxeles con huecos en las series temporales han sido enmascarados. Estos resultados se elaboraron sobre el sistema de referencia de trabajo en coordenadas geodésicas (EPSG 4326), a partir de sendas muestras extraídas con criterio aleatorio-estratificado de los tres territorios. Sus tamaños fueron de 127.394 (España peninsular), 1.833 (Baleares) y 2.275 (Canarias) puntos.

4. Validación

El Mapa de Condición de la Tierra 2000-2010 es un producto, y como tal debe ser declarado válido antes de que el usuario lo incorpore a su sistema de trabajo. Ese es el objetivo principal de esta sección.

Una validación en esos términos debe ser realizada con otro producto independiente que asuma o genere información directamente relacionada con el producto a validar. Adicionalmente, los datos de validación deben tener escalas espaciales y temporales comparables. Eso excluye en este caso un tipo de datos frecuentemente usados para validar, que es el contraste en campo. Las observaciones de campo raramente consiguen agregar sus muestreos a resoluciones espaciales y temporales como la aplicada en el mapa de condición de la tierra, resultando en variabilidades extremas que invalidan cualquier contraste estadístico. Además, el tamaño del área de estudio en este caso excede cualquier intento de realizar un muestreo económico y eficiente.

La validación del mapa de condición de la tierra puede realizarse sobre el producto final o sobre las funciones ecológicas usadas para crearlo. La primera aproximación sería deseable, pero desafortunadamente este tipo de productos se encuentra en la frontera de la investigación ambiental y no existen precedentes para ese fin. La mayoría de los productos relacionables con el mapa de condición de la tierra proceden a su vez de nociones perceptuales sobre la degradación, sus leyendas están plagadas de juicios de valor ('bueno', 'regular', 'pobre', etc.) y tienen en sí mismos graves problemas de validación.

Queda, entonces, la posibilidad de validar las funciones de $2dRUE$ incorporadas al mapa de condición de la tierra. Esta aproximación se basa aquí en contrastes estadísticos que permitan aceptar o rechazar claramente la hipótesis nula de que dichas funciones carecen de utilidad alguna para la valoración de estados y el seguimiento de tendencias de condición. Es decir, se parte de la base de que el mapa de condición de la tierra es falso e inútil.

4.1. Validación de las tendencias

La extracción de tendencias se basa en $2dRUE$ en la aplicación de una regresión múltiple paso a paso para determinar, por separado, los efectos de la variabilidad climática interanual y del tiempo sobre la biomasa anual media de la vegetación (Sección 3.2). El procedimiento es estadístico y usa umbrales de significación ($\alpha=0.10$) para determinar, por este orden, si no existe relación entre la biomasa y sus predictores, si existe sólo con uno de ellos, o si existe con ambos. Es decir, cualquier asignación de tendencia tiene lugar rechazando con un 90% de confianza la hipótesis nula de que el sitio en cuestión es *Estático*. Este proceder es conservador y explica en parte la frecuencia de este resultado en el mapa de condición de la tierra. Pero al mismo tiempo, la validación es inherente a la extracción de tendencias en $2dRUE$ y por ello no es necesario ejercicio adicional alguno.

4.2. Validación de los estados

La asignación de estados en $2dRUE$ se basa en sendas implementaciones a dos escalas temporales del concepto de RUE (Sección 3.1). Los estados que resultan en el mapa están directamente relacionados con las magnitudes relativas de dichas implementaciones, que se asocian respectivamente con biomasa y productividad de

la cubierta vegetal. Por tanto, los estados reflejados en el mapa podrían darse por validados si se prueba una relación estadística entre ellos y otra medida independiente de la condición del ecosistema.

El RUE es una medida de eficiencia que relaciona la entrada (precipitación) con la salida (PPNE) del sistema, y como tal es mucho más estable que cualquiera de las dos variables que emplea. Esa estabilidad procede del suelo. Sólo pueden darse valores elevados de RUE cuando el suelo se encuentra en buen estado, y es capaz de suministrar agua y nutrientes a la vegetación durante los períodos secos entre eventos lluviosos. En el extremo opuesto, suelos degradados o muy erosionados apenas tendrán esa capacidad de regulación, y las estimaciones de RUE resultarán proporcionalmente menores.

Por otra parte, una medida fiable del estado de un suelo es su contenido en carbono orgánico (SOC), a su vez el componente principal de la materia orgánica total. El SOC deriva de material residual de animales y plantas, que es metabolizado por la flora microbiana bajo la influencia de condiciones ambientales que incluyen la temperatura y humedad del suelo, la litología, y la topografía. La variación anual de SOC depende de dichos factores físico-químicos y también del sistema de uso a que está sometido el suelo. Por ello, el SOC es usado frecuentemente como indicador de la degradación de suelos.

El planteamiento de este ejercicio es, por tanto buscar posibles relaciones entre los estados derivados del RUE que resultan en el mapa de condición de la tierra, y el SOC. Para ello se ha usado el Mapa de Carbono Orgánico en la Capa Superficial del Suelo en Europa (Jones et al., 2004). Este mapa refleja el SOC en los 30 cm superiores del suelo como porcentaje del total, a una escala comparable a la del mapa de condición de la tierra, para todo el continente europeo y zonas de influencia. Desafortunadamente, no hay datos para Canarias, por lo que esta validación se refiere a España peninsular y Baleares en sentido estricto.

Se realizaron dos contrastes estadísticos para la determinación de relaciones entre estados de condición y SOC, usando la muestra de puntos descrita en la Sección 3.5:

- Relaciones entre las distribuciones de frecuencias de estados de condición y niveles cuantitativos de SOC. Se usó el método no paramétrico de Kruskal-Wallis, equivalente a un ANOVA por rangos, para determinar si los estados de condición contienen niveles significativamente diferentes de SOC entre ellos. A continuación se realizaron múltiples comparaciones mediante la media de los rangos para identificar los estados de condición responsables de esas posibles diferencias.
- Asociación entre grupos de estados de condición y cierto umbral de SOC. El umbral fue el de 2%, que se relaciona con un nivel crítico de SOC por debajo del cual se recomienda un cambio de gestión o incluso aporte directo de materia orgánica (Jones et al., 2004). El propósito fue averiguar si los estados más degradados del mapa de condición discriminan adecuadamente este umbral. Se aplicó una prueba de chi-cuadrado.

4.2.1. Relaciones entre las distribuciones de frecuencias de estados de condición y niveles cuantitativos de SOC

Universo estadístico: España peninsular y Baleares

Muestra: 127.820 puntos según diseño aleatorio-estratificado

Variable independiente (grupos): Estados (8 clases)

Variable dependiente (continua): Contenido (%) de SOC

H_0 : El SOC no cambia entre estados de condición

Resultado: Kruskal-Wallis $H = 11151.81$, $d.f. = 7$, $p < 1E-03$, Se rechaza H_0 .

El rechazo de H_0 implica que los niveles de SOC son significativamente diferentes entre los estados de condición. Eso es importante, pero era necesario aclarar cómo se distribuyen dichas diferencias (es decir, si hay 7 estados iguales y 1 muy distinto, si todos son distintos entre ellos, o cualquier combinación intermedia). La prueba de múltiples comparaciones condujo entonces al resultado mostrado por la Figura 4.1.

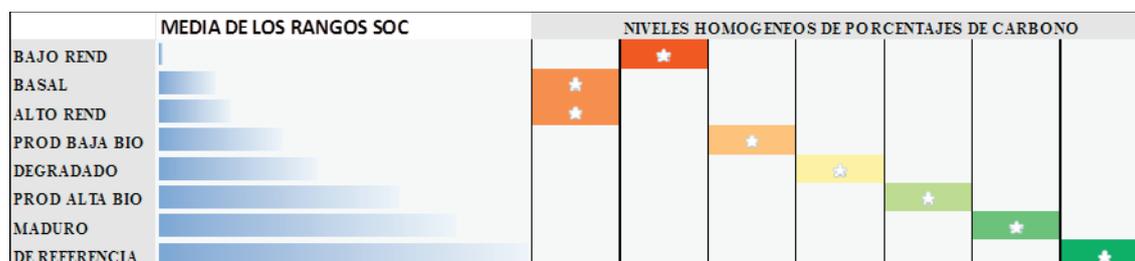


Figura 4.1. Agrupación de estados de condición de la tierra (2000-2010) por niveles homogéneos de SOC (%) (Kruskal-Wallis $H = 11151.81$, $d.f. = 7$, $p < 1E-03$). Las barras azules representan medias de los rangos de SOC para cada estado. Los asteriscos indican grupos homogéneos de estados por niveles de SOC. Los colores indican SOC (%) en una escala creciente del mínimo (rojo) al máximo (verde).

Los resultados demuestran que la ordenación creciente de los estados por el grado de madurez ecológica que representan (tal como aparecen en las leyendas del mapa de condición) implica niveles de SOC que aumentan en proporcionalidad directa. Además, los estados discriminan los niveles de SOC, de modo que en general cada estado es diferente de todos los demás. Hay dos discordancias respecto a este patrón general (Figura 4.2).

La primera es que los estados *Basal* y de *Anomalía de alto rendimiento* resultan homogéneos en términos de SOC. La segunda es que el estado *Degradado* contiene mayores niveles de SOC que el estado *Productivo con baja biomasa*. Estos dos aspectos se discuten en la Sección 4.2.3.

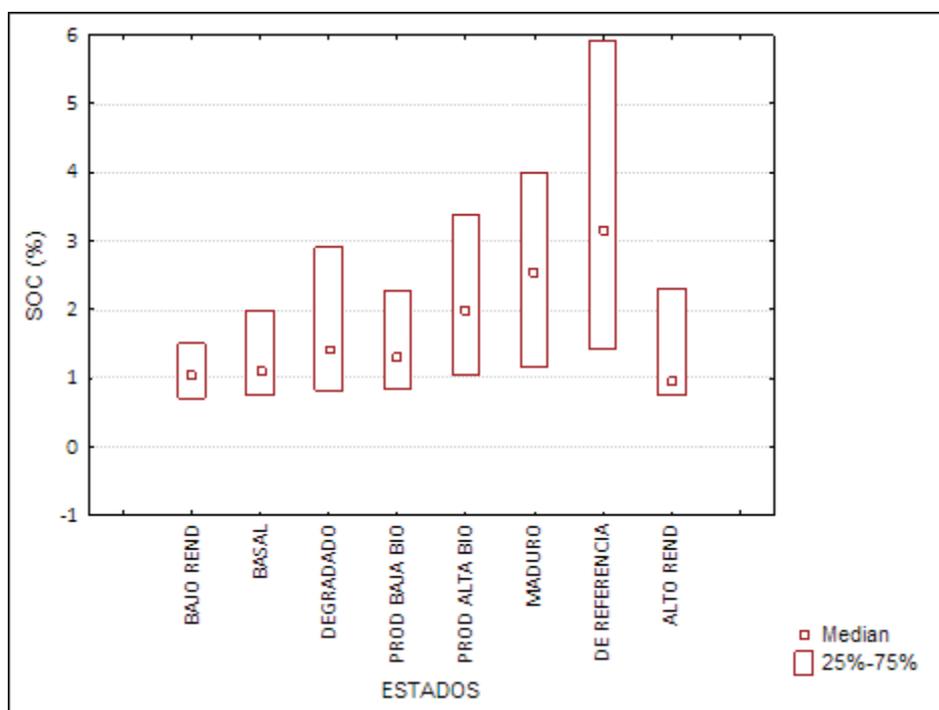


Figura 4.2. Niveles de SOC (%) en los estados de condición.

4.2.2. Asociación entre grupos de estados de condición y el umbral SOC < 2%

Universo estadístico: España peninsular y Baleares
 Muestra: 127.820 puntos según diseño aleatorio-estratificado
 Variable 1: Estados (8 clases)
 Variable 2: Contenido (%) de SOC (2 clases)
 H₀: No existe relación entre variables
 Resultado: $c^2 = 10839.1237$, $d.f. = 7$, $p < 1E-03$, Se rechaza H₀.

El rechazo de H₀ implica que los estados se discriminan correctamente alrededor del umbral de SOC < 2%. La Tabla 4.1 muestra la tabla de contingencia de residuales tipificados, cuyos valores son comparables entre sí independientemente de las frecuencias observadas, y proporcionales a la intensidad de la asociación positiva o negativa. En este formato de residuales, valores absolutos superiores a 1.96 (es decir, todos en la tabla) son significativos e interpretables para la casilla correspondiente con un 95% de confianza. Los estados asociados a un nivel de SOC inferior al 2% son: *Anomalía de bajo rendimiento*, *Basal*, *Productivo con baja biomasa* y *Anomalía de alto rendimiento*.

Tabla 4.1. Asociación entre estados de condición y clases de SOC definidas alrededor del umbral 2%. Los valores son residuales tipificados (unidades de desviación típica) ($c^2 = 10839.1237$, $d.f. = 7$, $p < 1E-03$)

	Anom. bajo rendim.	Basal	Degrad.	Product. baja biomasa	Product. alta biomasa	Maduro	Referen.	Anom. alto rendim.
SOC < 2%	64.9	18.7	-8.4	32.6	-41.4	-59.5	-39.1	5.7
SOC ≥ 2%	-64.9	-18.7	8.4	-32.6	41.4	59.5	39.1	-5.7

4.2.3. Discusión y conclusiones

Los niveles de SOC dependen de cambios en la cubierta vegetal. Por ello, es necesario usar en esta discusión algunas claves que relacionan estados de condición con tipos de cubierta vegetal, las cuales se desarrollan detalladamente en las Secciones 5.3.1 y 5.3.2.

En particular, los cambios de vegetación natural a cultivo reducen los aportes orgánicos y degradan la estructura del suelo, causando pérdidas de SOC. Esas pérdidas se explican por el laboreo mecánico, que aumenta la mineralización de la materia orgánica y facilita pérdidas adicionales por erosión y arrastre (Albaladejo et al., 2009). Esto explica bien el acoplamiento entre estados de condición y niveles de SOC detectados por el primer análisis.

El resultado de que los estados *Basal* y *Anomalía de alto rendimiento* sean indistinguibles en términos de SOC se explica fácilmente porque ambos estados contienen mayoritariamente vegetación agrícola. Su diferencia funcional se encuentra en la producción, pero no en el tamaño de sus reservas de SOC.

Respecto al resultado de que el estado *Degradado* contiene mayores niveles de SOC que el estado *Productivo con baja biomasa*, puede explicarse también por sus tipos dominantes de cubierta vegetal según el MFE1000. El *Degradado* consiste frecuentemente en 'bosques', 'matorrales medios en climas secos y húmedos', y 'repo-

blaciones de frondosas exóticas en climas secos'. El *Productivo con baja biomasa* se asocia especialmente con 'distribuciones adhesionadas (5-35%) en climas secos', y también con 'mosaicos forestal-agrícolas' y 'rodajes en cultivos'. El caso de las dehesas merece ser destacado porque investigaciones recientes demuestran que el estado general de sus suelos es globalmente malo y con indicios de degradación (Pulido and Picardo, 2010), y que la sobrecarga ganadera afecta a la regeneración y estado general del monte (Pinto, 2012). Es decir, puede suponerse que la intensidad de explotación es comparativamente mayor en el *Productivo con baja biomasa* que en el *Degradado*, incluso si este último incluye representaciones simplificadas de cubiertas maduras como los bosques.

Adicionalmente, la profundidad de las raíces de los tipos funcionales de vegetación afectan al SOC en el perfil del suelo: dado un clima, el máximo porcentaje de SOC (relativo al primer metro de suelo) se encuentra a mayor profundidad en arbustos, a una profundidad intermedia en pastos y es más superficial en bosques (Jobbagy and Jackson, 2000). Eso es coherente con los resultados presentados aquí, no sólo por la relación entre *Degradado* y cubierta forestal, sino por el patrón más general mostrado por la Figura 4.2. Por todo ello, no es raro que entre estas clases se produzca una inversión de los niveles de SOC.

El análisis de asociación entre estados y el umbral 2% de SOC confirma los resultados anteriores y sitúa los estados más simplificados por debajo de ese umbral, lo que es un buen acuerdo, incluso intuitivamente, con la escala de madurez usada en el mapa de condición de la tierra. La inclusión del estado *Degradado* por encima del umbral de SOC junto con los más maduros (*Productivo con alta biomasa*, *Maduro* y *Referencia*) está relacionada con la frecuencia de bosques, como se explica más arriba. Ello es, en cierto modo, la excepción que confirma la regla.

A la vista del desarrollo de este ejercicio, los estados de condición de la tierra pueden considerarse validados.

Un beneficio adicional de la relación entre los estados producidos por 2dRUE y el SOC, determinada en esta validación, es el hecho de que el SOC tiene a su vez relaciones bien definidas con los usos de la tierra (Rodríguez-Murillo, 2001). Por tanto, se trata de un primer paso para vincular formalmente el resultado de modelos socio-económicos que simulen la evolución de usos de la tierra con estimaciones reales del efecto que los mismos usos tienen sobre su degradación. El mapa de condición de la tierra es, desde esta perspectiva, el soporte espacial de dicho vínculo.



5. Interpretación

Las clases asociadas al mapa de condición de la tierra reflejan estados y tendencias ecológicas, y como tales pueden darse en una variedad de formaciones vegetales. El objetivo de esta sección es relacionar dichas clases con los paisajes dominantes en España y sus comunidades autónomas. De este modo, se podrá dotar de una interpretación más eficaz a las consultas y análisis expuestos en los Resultados del mapa.

El MFE1000 es una fuente de datos idónea para ese objetivo por varias razones: i) es un producto independiente; ii) ha sido desarrollado consistentemente para el mismo territorio (España) que el mapa de condición; iii) su escala es compatible con la resolución espacial del mapa de condición; y iv) su foco principal es la vegetación natural y seminatural alimentada por la lluvia, pero permite realizar una partición completa del territorio incluyendo zonas agrícolas.

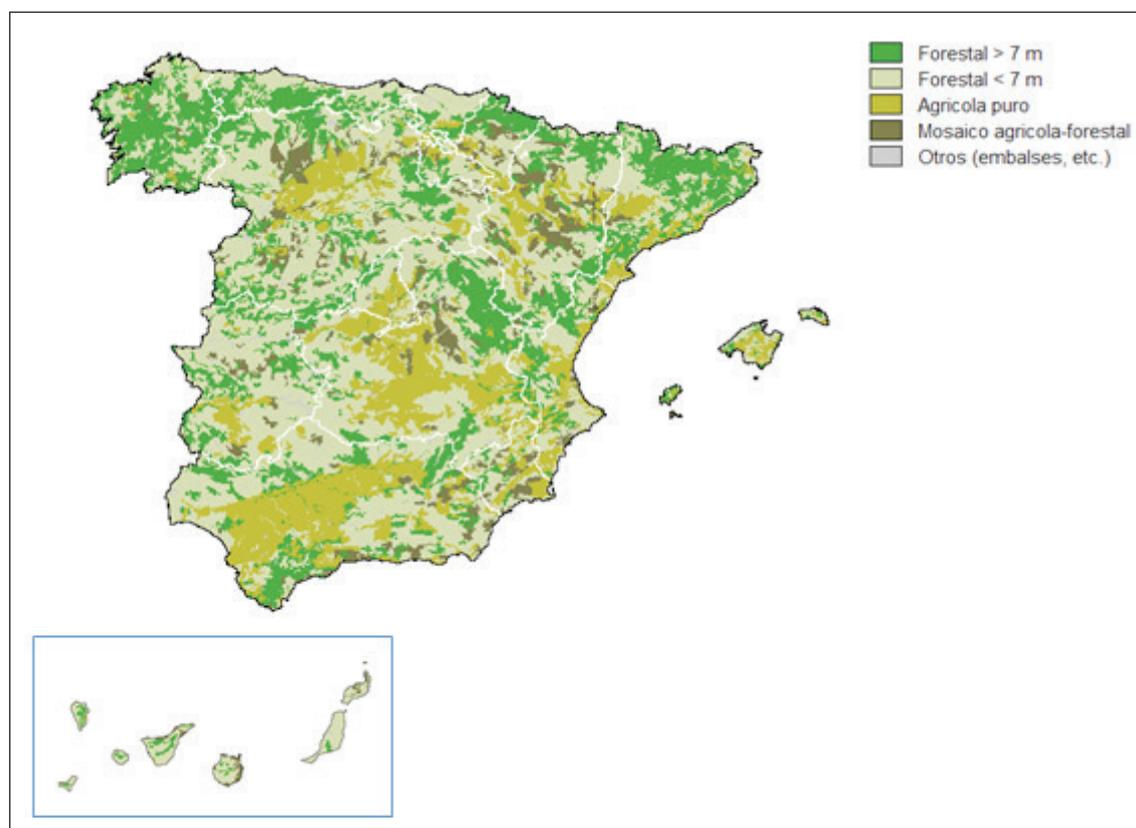


Figura 5.1. Clases de paisajes derivados del MFE1000. En el mapa se muestran las cuatro clases elementales. Sistemas de referencia EPSG 25830 (Península y Baleares) y EPSG 4083 (Canarias). Las escalas relativas son aproximadas.

El formato del MFE1000 es el de cobertura vectorial con una base de datos asociada, donde las teselas son unidades elementales de homogeneidad. El campo denominado *Sobrecolor* ha sido seleccionado para el propósito interpretativo de este ejercicio. Consiste en un código alfanumérico que indica la estructura actual de la vegetación. La letra se refiere a la influencia del clima: terreno con humedad edáfica, terreno seco, halo-xerófilo o yesoso, y cubiertas intrazonales sin dependencia climática. El número a continuación indica la *sobrecarga*,

referida a la estructura de la vegetación en términos de talla de la especie dominante y, a veces, modo de distribución espacial de la cubierta y naturaleza del sustrato (Ruiz de la Torre, 2002).

En el MFE1000 hay teselas sin *Sobrecolor*, y corresponden a vegetación con talla superior a 7 m (mayormente forestal), zonas agrícolas con inclusión variable de árboles, etc. Dentro de este conjunto, y con auxilio de los campos *Definición* (que describe las formaciones o especies dominantes) y *TipoNivel* (que describe el tipo de formación y su nivel evolutivo en términos de protección de suelo), se separaron el bosque con arbolado superior a 7 m, las zonas agrícolas puras, y los mosaicos forestales y agrícolas.

El mapa que fue derivado del MFE (Figura 5.1) para la interpretación del mapa de condición realiza, por tanto, una partición del territorio en los siguientes términos:

- Vegetación con *Sobrecolor* aplicando el código correspondiente. Siempre forestal o natural con tallas inferiores a 7 m.
- Bosques. Arbolado superior a 7 m.
- Agricultura:
 - Áreas agrícolas puras. Cultivos de secano extensivo y regadío mixto. A veces con inclusiones de bosques de galería, repoblaciones de eucaliptos, rodales de pinos y otras formaciones de menor tamaño.
 - Mosaicos agrícolas y forestales. Varios tipos de estructuras agrícolas: cultivos con inclusiones de vegetación natural arbórea o arbustiva, mosaicos de evolución cíclica agrícola-pastizal, mosaicos dendriformes agrícola-pastizal o agrícola-matorral, y mosaicos irregulares mezcla agrícola y forestal, entre otros.

En la interpretación de la condición de la tierra mediante estas clases, el patrón general seguido fue seleccionar aquellas con una representación en el territorio superior al 0.5%. En ocasiones, este criterio no fue suficiente para cumplir con los requisitos recomendados para el análisis de chi-cuadrado con más de 1 grados de libertad: no debe haber más de un 20% de frecuencias esperadas menores que 5, y no debe haber frecuencias esperadas menores que 1 (Siegel and Castellan, 1988). Consecuentemente algunas clases fueron reagrupadas o incluso eliminadas en el nivel de análisis correspondiente.

El método consistió en realizar contrastes de chi-cuadrado para buscar posibles asociaciones estadísticas entre las clases de paisaje derivadas del MFE1000, y las clases de condición, separando estados y tendencias. Para ello se empleó la muestra de puntos descrita en la Sección 3.5. Cuando la asociación entre ambas variables resultó significativa, los residuales fueron procesados mediante un código de color para facilitar una interpretación intuitiva de las combinaciones entre variables que arrojaron asociaciones positivas o negativas.

Esos análisis fueron realizados en tres niveles de detalle complementarios:

- El primero asocia las clases de condición de la tierra con los tres tipos principales de cubierta vegetal descritos más arriba, para todo el territorio español.
- El segundo asocia las clases de estados y de tendencias para todo el territorio español, respectivamente, con los tres tipos principales de cubierta vegetal, dentro de cada comunidad autónoma
- El tercero asocia las clases de estados y de tendencias, respectivamente, con esos mismos tipos de vegetación, pero de forma más detallada expandiendo el campo *Sobrecolor*, dentro de cada una de las tres aplicaciones territoriales del mapa de condición (península, Baleares y Canarias).

No fue posible realizar un único análisis con todo el detalle posible, tanto en tipos de cubierta como en dominio espacial, debido a que la cantidad de casillas vacías en las tablas de contingencia violaba las condiciones estadísticas referidas anteriormente.

5.1. Asociación entre condición de la tierra y tipos de cubierta vegetal

Universo estadístico: España en conjunto
 Muestra: 129.999 puntos (excluye embalses y otras superficies no relevantes)
 Variable 1: Condición de la tierra (32 clases)
 Variable 2: Tipos de cubierta vegetal derivados del MFE1000 (3 clases)
 H₀: No existe relación entre variables
 Resultado: $\chi^2 = 29042.126$, $d.f. = 62$, $p < 1E-03$, Se rechaza H₀.

Por tanto, existe una relación significativa entre ambas variables, y sus residuales pueden ser interpretados (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Asociación entre condición de la tierra y tipos de cubierta vegetal para el estado español. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo), y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.

Condición de la Tierra	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRÍCOLA
ANOM BAJO REND DEGRADÁNDOSE			
ANOM BAJO REND FLUCTUANDO	Red	Red	Blue
ANOM BAJO REND AUMENTANDO	Red		Blue
ANOM BAJO REND ESTÁTICA	Red	Red	Blue
BASAL DEGRADÁNDOSE			
BASAL FLUCTUANDO	Red		Blue
BASAL AUMENTANDO			
BASAL ESTÁTICA	Red		Blue
DEG DEGRADÁNDOSE			
DEG FLUCTUANDO		Blue	
DEG AUMENTANDO	Blue	Red	Red
DEG ESTÁTICA	Blue		Red
PRODUCTIVO CON BAJA BIOMASA DEGRADÁNDOSE	Red	Blue	Blue
PRODUCTIVO CON BAJA BIOMASA FLUCTUANDO			
PRODUCTIVO CON BAJA BIOMASA AUMENTANDO			
PRODUCTIVO CON BAJA BIOMASA ESTÁTICA	Red	Blue	Blue
PRODUCTIVO CON ALTA BIOMASA DEGRADÁNDOSE			
PRODUCTIVO CON ALTA BIOMASA FLUCTUANDO	Red	Blue	Red
PRODUCTIVO CON ALTA BIOMASA AUMENTANDO	Blue	Red	Red
PRODUCTIVO CON ALTA BIOMASA ESTÁTICA	Blue		Red
MADURO DEGRADÁNDOSE			
MADURO FLUCTUANDO			
MADURO AUMENTANDO	Blue	Red	Red
MADURO ESTÁTICA	Blue	Red	Red
DE REFERENCIA DEGRADÁNDOSE			
DE REFERENCIA FLUCTUANDO			
DE REFERENCIA AUMENTANDO	Blue	Blue	Red
DE REFERENCIA ESTÁTICA	Blue	Blue	Red
ANOM ALTO REND DEGRADÁNDOSE			
ANOM ALTO REND FLUCTUANDO			
ANOM ALTO REND AUMENTANDO			
ANOM ALTO REND ESTÁTICA			

La interpretación de los residuales en la Tabla 5.1 resulta en un patrón sencillo que refleja consistentemente la tensión entre explotación y madurez, y se relaciona bien con una sucesión ecológica idealizada. Así:

- Los estados de *Anomalía de bajo rendimiento* y *Basal* están positivamente asociados a terrenos agrícolas con cualquier tendencia. Siempre tienen asociación negativa con la vegetación de talla superior a 7 m, y sucede lo mismo con la vegetación menor a 7 m excepto si la tendencia es *Aumentando*.
- El estado *Degradado* se asocia principalmente con vegetación forestal mayor de 7 m si está *Aumentando* o *Estática*, y con vegetación natural menor de 7 m si está *Fluctuando* o *Estática*. Su asociación con vegetación agrícola es negativa o nula.
- El estado *Productivo con baja biomasa* ocurre principalmente en vegetación natural menor a 7 m (excepto si está *Degradándose*) y en vegetación agrícola con cualquier tendencia.
- El estado *Productivo de alta biomasa* es frecuente en vegetación forestal mayor de 7 m *Aumentando* o *Estática*, y en menor medida en vegetación natural menor de 7 m que está *Fluctuando*.
- El estado *Maduro* se relaciona intensamente con vegetación forestal mayor de 7 m, sea *Aumentando* o *Estática*, y en mucha menor medida con vegetación natural menor de 7 m *Fluctuando*. Tiene fuerte repulsión hacia vegetación agrícola.
- El estado de *Referencia* también tiene su mayor asociación con vegetación forestal mayor de 7 m *Aumentando* o *Estática*, pero también incluye vegetación natural menor de 7 m excepto si se encuentra *Degradándose*. Su relación con vegetación agrícola es muy negativa o nula.
- El estado de *Anomalía de alto rendimiento* está asociado sobre todo con vegetación agrícola, y puede incluir vegetación forestal mayor de 7 m si está *Aumentando*.

5.2. Asociación entre clases de condición y tipos de cubierta vegetal por comunidades autónomas

En este caso se realizaron dos análisis de chi-cuadrado con los puntos de la muestra descrita en la Sección 3.5 que cayeron dentro de cada comunidad autónoma. En el primer análisis, las tablas de contingencia relacionaban 3 clases de cubierta vegetal (forestal mayor de 7 m, forestal menor de 7 m y agricultura) con las 8 clases de estados de condición. En el segundo se usaban las mismas clases de cubierta, pero con las 4 clases de tendencias:

Análisis 1:

Universo estadístico: comunidades autónomas, procesadas por separado

Muestra: subconjunto de 129.999 puntos (excluye embalses y otras superficies no relevantes) incluidos en la comunidad autónoma en cuestión

Variable 1: Estados de condición de la tierra (8 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal derivados del MFE1000 (3 clases)

H_0 : No existe relación entre variables

Resultado: Se rechaza H_0 en todos los casos con $p < 1E-03$.

Análisis 2:

Universo estadístico: comunidades autónomas, procesadas por separado

Muestra: subconjunto de 129.999 puntos (excluye embalses y otras superficies no relevantes) incluidos en la comunidad autónoma en cuestión

Variable 1: Tendencias de condición de la tierra (4 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal derivados del MFE1000 (3 clases)

H_0 : No existe relación entre variables

Resultado: Se rechaza H_0 en todos los casos con $p < 1E-03$.

Cinco de las comunidades autónomas (Asturias, Cantabria, País Vasco, Madrid y Extremadura) no pudieron ser analizadas debido a la aparición de casillas vacías en las tablas de contingencia. En todos los demás casos, ambos análisis detectan asociaciones significativas, y sus residuales respectivos pueden ser interpretados. Los resultados se presentan de forma simplificada en las Tablas 5.2 y 5.3. En ellas, los residuales obtenidos para cada comunidad autónoma han sido codificados solo según su signo, ya que sus valores no son comparables entre comunidades autónomas por tratarse de análisis independientes. De esa forma puede interpretarse rápidamente las clases de condición que muestran asociación positiva o negativa con un tipo de vegetación dado dentro de cada comunidad autónoma.

Como cabría esperar, estos nuevos resultados son coherentes con los obtenidos en el análisis anterior. Por ejemplo, en todas las comunidades autónomas, los estados de *Anomalía con bajo rendimiento* o *Basal* aparecen de nuevo asociados positivamente con vegetación agrícola o forestal de bajo porte, mientras que los estados *Maduro* o de *Referencia* aparecen asociados con vegetación natural mayor de 7 m.

Sin embargo, la interpretación primaria para estos resultados debe ser realizada por comunidades autónomas. Por ejemplo, en Aragón, las *Anomalías de alto rendimiento* se relacionan con vegetación agrícola, lo que puede ser atribuido a los regadíos del Ebro. O bien, Canarias muestra asociación entre vegetación forestal mayor de 7 m con la tendencia *Degradándose*, lo cual puede relacionarse con incendios ocurridos en 2007. Este ejercicio es demasiado prolijo para hacerlo aquí de manera sistemática, pero proporciona una clave muy útil para interpretar los resultados del mapa de condición de la tierra expuestos más adelante.

Tabla 5.2. Asociación entre clases de cubierta vegetal derivadas del MFE1000 y clases de estado de condición de la tierra por comunidades autónomas en España. Leyenda: asociación significativa positiva (marca verde), significativa negativa (marca roja) o no significativa (blanco). Todas las asociaciones indicadas fueron analizadas mediante χ^2 y son significativas para $p < 10E-3$.

BAJO REND	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA	BASAL	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA
Galicia	×	✓	✓	Galicia	×		✓
Asturias				Asturias			
Cantabria				Cantabria			
País Vasco				País Vasco			
Navarra	×	✓	✓	Navarra	×		✓
La Rioja	×			La Rioja	×		✓
Aragón	×	×	✓	Aragón	×		✓
Madrid				Madrid			
Castilla y León	×	✓	✓	Castilla y León	×	✓	
Castilla-La Mancha	×	×	✓	Castilla-La Mancha	×	×	✓
Extremadura				Extremadura			
Cataluña	×	×	✓	Cataluña	×		✓
Valencia	×	×	✓	Valencia	×	✓	✓
Baleares	×	✓	×	Baleares		✓	
Andalucía	×	✓	✓	Andalucía	×	×	✓
Murcia	×	×	✓	Murcia	×		✓
Canarias	×	✓	×	Canarias	×	✓	

DEGRAD	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA	PROD BAJA BIO	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA
Galicia	✓	✗	✗	Galicia	✗		✓
Asturias				Asturias			
Cantabria				Cantabria			
País Vasco				País Vasco			
Navarra	✓		✗	Navarra	✗	✓	✓
La Rioja	✗		✓	La Rioja	✗	✓	✓
Aragón	✓		✗	Aragón	✗	✓	
Madrid				Madrid			
Castilla y León	✓	✓	✗	Castilla y León	✗		✓
Castilla-La Mancha	✓	✓	✗	Castilla-La Mancha	✗	✓	✗
Extremadura				Extremadura			
Cataluña	✗		✓	Cataluña	✗	✓	✓
Valencia	✗	✓	✓	Valencia		✓	✗
Baleares		✗	✓	Baleares	✗	✗	✓
Andalucía	✓	✓	✗	Andalucía		✓	✗
Murcia	✗		✓	Murcia		✓	✗
Canarias	✗	✓	✗	Canarias	✗		✓

PROD ALTA BIO	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA	MADURO	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA
Galicia	✗	✓		Galicia	✓	✗	
Asturias				Asturias			
Cantabria				Cantabria			
País Vasco				País Vasco			
Navarra		✓	✗	Navarra	✓	✗	✗
La Rioja	✓		✗	La Rioja	✓		✗
Aragón	✓	✗	✗	Aragón	✓	✗	✗
Madrid				Madrid			
Castilla y León	✓	✗	✗	Castilla y León	✓	✗	✗
Castilla-La Mancha	✓	✓	✗	Castilla-La Mancha	✓		✗
Extremadura				Extremadura			
Cataluña	✓	✓	✗	Cataluña	✓	✗	✗
Valencia	✓	✗	✗	Valencia		✗	✗
Baleares	✓		✗	Baleares	✓		✗
Andalucía	✓	✓	✗	Andalucía	✓		✗
Murcia	✓		✗	Murcia	✓		✗
Canarias		✓	✓	Canarias	✓		✗

DE REFERENCIA	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA	ALTO REND	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA
Galicia	✗	✓		Galicia	✗	✓	
Asturias				Asturias			
Cantabria				Cantabria			
País Vasco				País Vasco			
Navarra	✓	✗	✗	Navarra		✗	✓
La Rioja	✓		✗	La Rioja			✓
Aragón	✓	✗		Aragón	✗	✗	✓
Madrid				Madrid			
Castilla y León	✓	✗	✗	Castilla y León	✓	✗	✗
Castilla-La Mancha	✓		✗	Castilla-La Mancha	✓		
Extremadura				Extremadura			
Cataluña	✓	✗	✗	Cataluña	✗	✗	✓
Valencia	✓	✗	✗	Valencia	✗	✗	✓
Baleares			✗	Baleares		✓	✗
Andalucía	✓	✓	✗	Andalucía	✓	✓	✗
Murcia	✓	✗		Murcia	✓		✗
Canarias	✓	✗	✗	Canarias	✗	✗	✓

Tabla 5.3. Asociación entre clases de cubierta vegetal y clases de tendencia de condición de la tierra por comunidades autónomas en España. Leyenda: asociación significativa positiva (marca verde), significativa negativa (marca roja) o no significativa (blanco). Todas las asociaciones indicadas fueron analizadas mediante χ^2 y son significativas para $p < 10E-3$.

DEGRADÁNDOSE	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA	FLUCTUANDO	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA
Galicia				Galicia	×	✓	
Asturias				Asturias			
Cantabria				Cantabria			
País Vasco				País Vasco			
Navarra		×	✓	Navarra	×	✓	✓
La Rioja				La Rioja			
Aragón	×	×	✓	Aragón	×	×	✓
Madrid	×	×	✓	Madrid	×	✓	×
Castilla y León				Castilla y León	×	✓	×
Castilla-La Mancha	×	×	✓	Castilla-La Mancha	×	✓	✓
Extremadura			×	Extremadura	×	✓	×
Cataluña	×	×	✓	Cataluña	×	✓	✓
Valencia	×	×	✓	Valencia	×	×	✓
Baleares			✓	Baleares		×	✓
Andalucía	×	×	✓	Andalucía	×	×	✓
Murcia		×	✓	Murcia	×	×	✓
Canarias	✓	×		Canarias	×	✓	✓

AUMENTANDO	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA	ESTÁTICA	VEG NAT MAYOR 7M	VEG NAT MENOR 7	AGRICOLA
Galicia	✓	×	×	Galicia	×	✓	✓
Asturias				Asturias			
Cantabria				Cantabria			
País Vasco				País Vasco			
Navarra		✓	×	Navarra	✓	×	×
La Rioja				La Rioja			
Aragón	✓	✓	×	Aragón	×	✓	
Madrid	✓	×	×	Madrid	×		✓
Castilla y León	✓	×	×	Castilla y León		✓	✓
Castilla-La Mancha	✓	×	×	Castilla-La Mancha	×	✓	
Extremadura	✓	×	×	Extremadura	×		✓
Cataluña	✓	×	×	Cataluña			
Valencia	✓	✓	×	Valencia		×	✓
Baleares	✓	✓	×	Baleares			×
Andalucía	✓	✓	×	Andalucía	✓	×	×
Murcia	✓	✓	×	Murcia	×	×	✓
Canarias	✓			Canarias		×	×

5.3. Asociación entre clases de condición y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal por aplicaciones territoriales

El propósito de esta serie de análisis fue obtener una descripción fisionómica lo más detallada posible de los estados y tendencias de condición de la tierra, considerados separadamente. Se realizaron seis análisis, dos por aplicación territorial. Los residuales (Tablas 5.4 a 5.9) fueron interpretados en los seis casos, con los siguientes resultados básicos:

5.3.1. España peninsular

i) Estados

Universo estadístico: España peninsular

Muestra: 123.367 puntos

Variable 1: Estados de condición de la tierra (8 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal (sobrecolor) derivados del MFE1000 (23 clases)

H_0 : No existe relación entre variables

Resultado: $\chi^2 = 46292.775$, $d.f. = 154$, $p < 1E-03$, Se rechaza H_0 .

Los siguientes resultados se extraen de la inspección de los residuales (Tabla 5.4):

- *Anomalía de bajo rendimiento*: se presenta frecuentemente como zonas agrícolas puras, mosaicos forestal agrícolas, arbustos sobre cultivos en clima más seco y, en menor medida, matorral bajo en clima más seco. Es muy raro que aparezca como bosques y arboledas.
- *Basal*: similar al anterior, pero con mayor preferencia por las zonas agrícolas y también por rodales y pies dispersos en terrenos agrícola de clima más seco.
- *Degradado*: sus mayores asociaciones se dan con bosques y arboledas, matorral medio en climas secos y húmedos, y repoblaciones con frondosas exóticas en clima más seco. Es muy raro que se de en zonas agrícolas puras o mosaicos forestal-agrícolas.
- *Productivo con baja biomasa*: se asocia principalmente con distribuciones adhesionadas en clima más seco, mosaicos forestal-agrícolas y, en menor grado, con rodales en cultivos y con rodales en terreno agrícola bajo clima seco. Muestra fuerte repulsión hacia bosques y arboledas.
- *Productivo con alta biomasa*: claramente vinculado a bosques y arboledas, y también a matorral arbustivo en climas secos y húmedos. Muy raro en zonas agrícolas puras o mosaicos forestal-agrícolas.
- *Maduro*: fuertemente vinculado a bosques y arboledas, y en menor medida a matorral medio en clima más húmedo y a repoblaciones de coníferas exóticas en clima más seco. Muy raro en zonas agrícolas puras o mosaicos forestal-agrícolas.
- *Referencia*: fuertemente vinculado a bosques y arboledas, y a repoblaciones y reforestaciones con frondosas y coníferas exóticas en clima más seco. Muy raro en zonas agrícolas puras o mosaicos forestal-agrícolas.
- *Anomalía de alto rendimiento*: claramente asociado con zonas agrícolas puras, a veces también con rodales del tipo climático estructural en cultivos, o con bosques y arboledas.
- Conviene observar que las mayores asociaciones de bosques y arboledas se dan con los estados *Productivo con alta biomasa* y *Maduro*. Además, el residual acumulado de estos estados junto con el de *Referencia* es casi tres veces superior al que tienen con *Degradado*. La consecuencia lógica es que hay una cantidad significativa de bosques y arboledas en estado *Degradado*, a pesar de lo cual su mayor asociación es con los estados más avanzados de madurez ecológica.

ii) Tendencias

Universo estadístico: España peninsular

Muestra: 123.367 puntos

Variable 1: Tendencias de condición de la tierra (4 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal (sobrecolor) derivados del MFE1000 (23 clases)

H_0 : No existe relación entre variables

Resultado: $\chi^2 = 17309.997$, $d.f. = 66$, $p < 1E-03$, Se rechaza H_0 .

Los siguientes resultados se extraen de la inspección de los residuales (Tabla 5.5):

- *Degradándose*: muy asociada con zonas agrícolas puras y, con menor presencia, repoblaciones de frondosas exóticas en clima más seco y matorral subarbusivo en clima más seco. Relativamente rara en el resto de las formaciones.
- *Fluctuando*: fuertemente asociada con zonas agrícolas puras, distribución adhesionada en clima más seco y mosaicos forestal-agrícolas. También se da en rodales pies dispersos sobre terreno agrícola en clima seco, y en prado o herbazal vivaz bajo clima seco. Muy rara en bosques y arboledas.
- *Aumentando*: fuertemente asociada con bosques y arboledas. También es frecuente en otras formaciones, sobre todo matorral arbustivo o medio en clima más seco y matorral medio en clima más húmedo. Muy rara en zonas y mosaicos agrícolas, y en distribuciones adhesionadas en clima más seco (esto último reviste gran interés más allá del presente ejercicio).
- *Estática*: frecuente en una variedad de formaciones, de entre las que cabe destacar las zonas agrícolas puras, los rodales de árboles del tipo climático estructural en clima más seco, y los rodales dispersos sobre terreno agrícola en clima húmedo. Rara en bosques y arboledas.

5.3.2. Baleares

i) Estados

Universo estadístico: Baleares

Muestra: 1.422 puntos

Variable 1: Estados de condición de la tierra (8 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal (sobrecolor) derivados del MFE1000 (4 clases)

H_0 : No existe relación entre variables

Resultado: $\chi^2 = 309.344$, $d.f. = 21$, $p < 1E-03$, Se rechaza H_0 .

Los siguientes resultados se extraen de la inspección de los residuales (Tabla 5.6):

- *Anomalía de bajo rendimiento*: muy presente en zonas agrícolas puras. Ausente en bosques y arboledas, ni en matorral bajo y medio.
- *Basal*: solo asociada con matorral sub-arbusivo o arbustivo en clima más seco.
- *Degradado*: solo asociada con zonas agrícolas puras.
- *Productivo con baja biomasa*: solo frecuente en zonas agrícolas puras.
- *Productivo con alta biomasa*: asociada principalmente con bosques y arboledas, pero también con las otras formaciones naturales. No se da en zonas agrícolas puras.
- *Maduro*: asociada principalmente con matorral subarbusivo-arbusivo, pero también bosques y arboledas y otras formaciones naturales. No se da en zonas agrícolas puras.
- *Referencia*: presente en matorral medio en clima más seco.
- *Anomalía de alto rendimiento*: matorral medio en clima más seco.

ii) Tendencias

Universo estadístico: Baleares

Muestra: 1.420 puntos

Variable 1: Tendencias de condición de la tierra (3 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal (sobrecolor) derivados del MFE1000 (4 clases)

H₀: No existe relación entre variables

Resultado: $\chi^2 = 93.683$, *d.f.* = 6, $p < 1E-03$, Se rechaza H₀.

Los siguientes resultados se extraen de la inspección de los residuales (Tabla 5.7):

- *Degradándose*: esta clase no pudo ser incluida debido al pequeño número de muestras.
- *Fluctuando*: solo en zonas agrícolas puras.
- *Aumentando*: en matorral sub-arbustivo o arbustivo en clima más seco y en bosques o arboledas.
- *Estática*: matorral bajo-medio en clima más seco, y en menor grado zonas agrícolas puras.

5.3.3. Canarias

i) Estados

Universo estadístico: España peninsular

Muestra: 123.367 puntos

Variable 1: Tendencias de condición de la tierra (4 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal (sobrecolor) derivados del MFE1000 (23 clases)

H₀: No existe relación entre variables

Resultado: $\chi^2 = 17309.997$, *d.f.* = 66, $p < 1E-03$, Se rechaza H₀.

Los siguientes resultados se extraen de la inspección de los residuales (Tabla 5.8):

- *Anomalía de bajo rendimiento*: suele mostrarse como lavas recientes intrazonales, y también como matorral sub-arbustivo intrazonal o matorral bajo y medio intrazonal.
- *Basal*: aparece principalmente como matorral medio con herbazal terofítico en clima más seco, matorral bajo y medio intrazonal y lavas recientes intrazonales.
- *Degradado*: casi siempre se trata de matorral bajo en clima más seco. Raro en mosaicos forestal-agrícolas.
- *Productivo con baja biomasa*: mosaicos forestal-agrícolas y matorral medio con herbazal terofítico en clima más seco.
- *Productivo con alta biomasa*: sobre todo se trata de matorral medio en clima más seco, pero también es frecuente en mosaicos de matorral y cultivo en clima más seco, mosaicos forestal-agrícolas y cultivos en rodaltes con árboles del tipo climático estructural.
- *Maduro*: principalmente como matorral bajo en clima más seco.
- *Referencia*: prácticamente solo como bosques y arboledas.
- *Anomalía de alto rendimiento*: presente en mosaicos forestal-agrícolas y, en menor medida, matorral medio en clima más seco.

ii) Tendencias

Universo estadístico: España peninsular

Muestra: 123.367 puntos

Variable 1: Tendencias de condición de la tierra (4 clases)

Variable 2: Tipos de cubierta vegetal (sobrecolor) derivados del MFE1000 (23 clases)

H_0 : No existe relación entre variables

Resultado: $\chi^2 = 17309.997$, *d.f.* = 66, $p < 1E-03$, Se rechaza H_0 .

Los siguientes resultados se extraen de la inspección de los residuales (Tabla 5.9):

- *Degradándose*: prácticamente solo en bosque y arboledas. Puede relacionarse con los incendios forestales ocurridos en 2007.
- *Fluctuando*: se da, por orden de importancia, en matorral medio en clima más seco, mosaicos forestal-agrícolas y matorral bajo en clima más seco. Infrecuente en bosques y arboledas.
- *Aumentando*: repartido entre bosques y arboledas, lavas recientes intrazonales, y matorral (sub-arbustivo o bajo y medio) intrazonal.
- *Estática*: principalmente bosques y arboledas, pero también cultivos con rodales de árboles del tipo climático estructural, y matorral medio, sub-arbustivo y arbustivo en clima más húmedo.

Tabla 5.4. Asociación entre estados de condición de la tierra y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal en España peninsular. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo), y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.

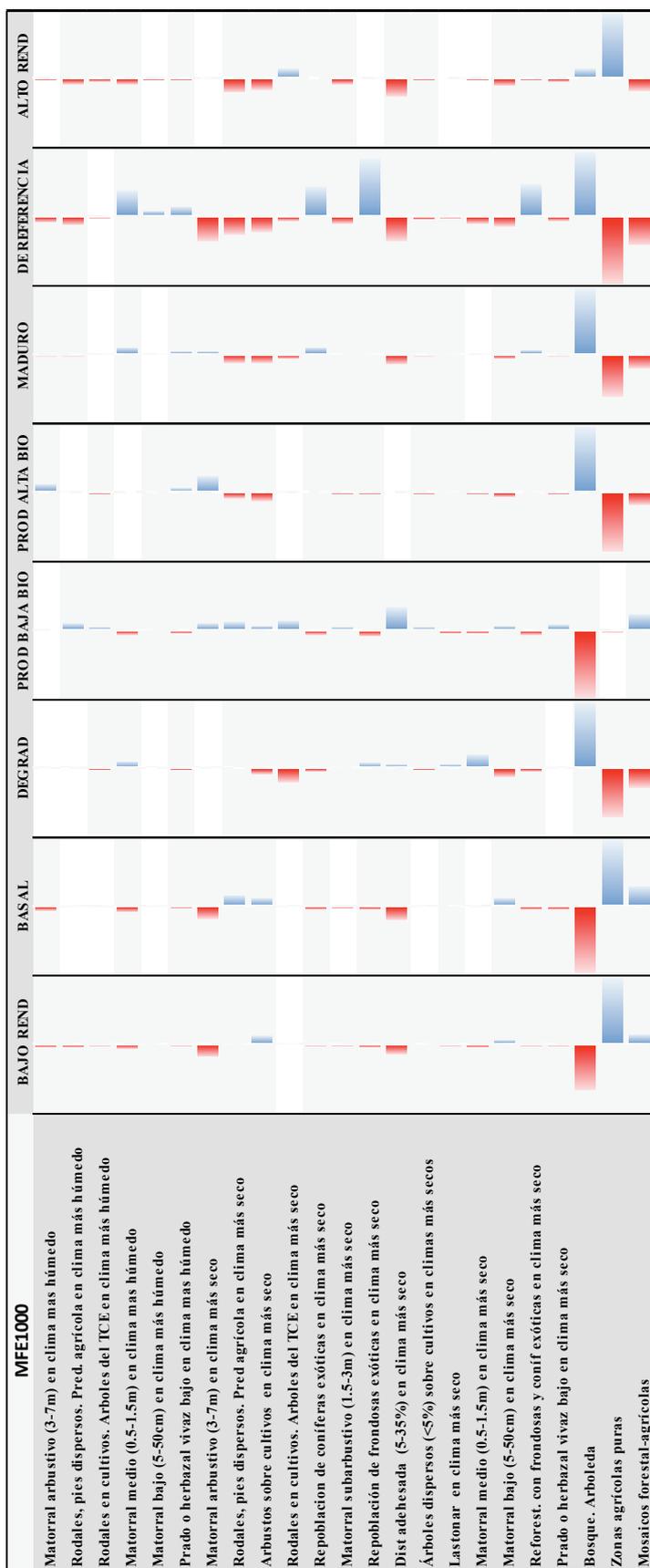


Tabla 5.6. Asociación entre estados de condición de la tierra y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal en Baleares. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo), y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.

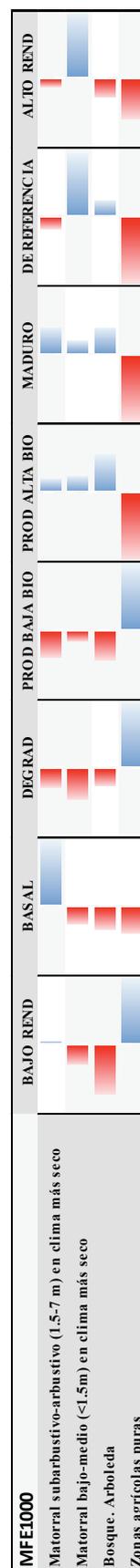


Tabla 5.5. Asociación entre tendencias de condición de la tierra y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal en España peninsular. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo), y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.

MFE1000	DEGRADÁNDOSE	FLUCTUANDO	AUMENTANDO	ESTÁTICA
Matorral arbustivo (3-7m) en clima mas húmedo				
Rodales, pies dispersos. Pred. agrícola en clima más húmedo				
Rodales en cultivos. Árboles del TCE en clima más húmedo				
Matorral medio (0.5-1.5m) en clima mas húmedo				
Matorral bajo (5-50cm) en clima más húmedo				
Prado o herbazal vivaz bajo en clima mas húmedo				
Matorral arbustivo (3-7m) en clima más seco				
Rodales, pies dispersos. Pred agrícola en clima más seco				
Arbustos sobre cultivos en clima más seco				
Rodales en cultivos. Árboles del TCE en clima más seco				
Replacion de coníferas exóticas en clima más seco				
Matorral subarbustivo (1.5-3m) en clima más seco				
Replacion de frondosas exóticas en clima más seco				
Dist adhesada (5-35%) en clima más seco				
Árboles dispersos (<5%) sobre cultivos en climas más secos				
Lastonar en clima más seco				
Matorral medio (0.5-1.5m) en clima más seco				
Matorral bajo (5-50cm) en clima más seco				
Reforest. con frondosas y conf exóticas en clima más seco				
Prado o herbazal vivaz bajo en clima más seco				
Bosque. Arboleda				
Zonas agrícolas puras				
Mosaicos forestal-agrícolas				

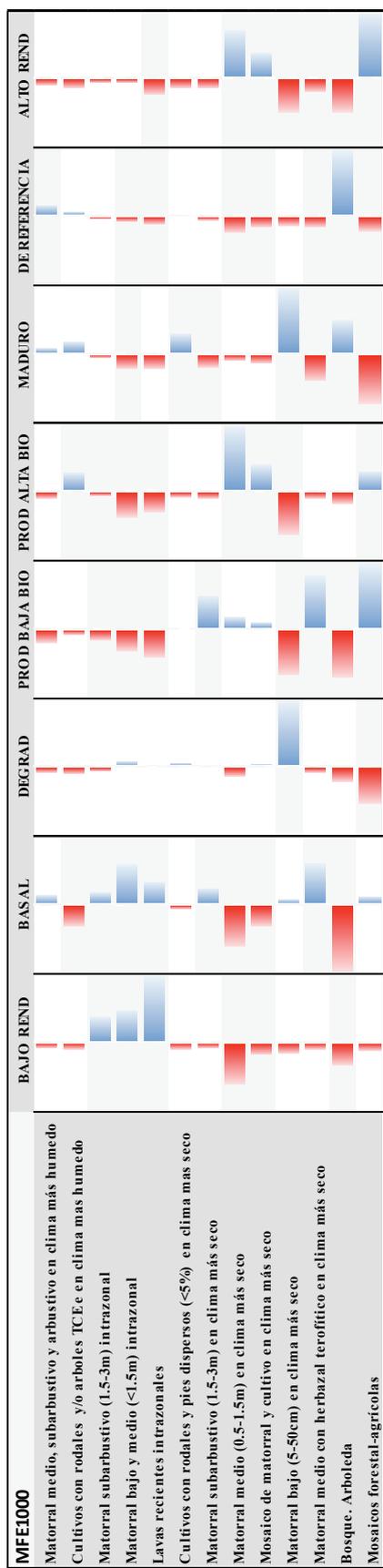
Tabla 5.7. Asociación entre tendencias de condición de la tierra y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal en Baleares. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo), y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.

MFE1000	DEGRADÁNDOSE	FLUCTUANDO	AUMENTANDO	ESTÁTICA
Matorral subarbustivo-arbustivo (1.5-7 m) en clima más seco				
Matorral bajo-medio (<1.5m) en clima más seco				
Bosque. Arboleda				
Zonas agrícolas puras				

Tabla 5.9. Asociación entre tendencias de condición de la tierra y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal en Canarias. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo), y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.

MFE1000	DEGRADÁNDOSE	FLUCTUANDO	AUMENTANDO	ESTÁTICA
Matorral medio, subarbustivo y arbustivo en clima más humedo				
Cultivos con rodales y/o arboles TCE en clima mas humedo				
Matorral subarbustivo (1.5-3m) intrazonal				
Matorral bajo y medio (<1.5m) intrazonal				
Lavas recientes intrazonales				
Cultivos con rodales y pies dispersos (<5%) en clima mas seco				
Matorral subarbustivo (1.5-3m) en clima más seco				
Matorral medio (0.5-1.5m) en clima más seco				
Mosaico de matorral y cultivo en clima más seco				
Matorral bajo (5-50cm) en clima más seco				
Matorral medio con herbazal terofítico en clima más seco				
Bosque. Arboleda				
Mosaicos forestal-agrícolas				

Tabla 5.8. Asociación entre estados de condición de la tierra y tipos detallados (Sobrecolor) de cubierta vegetal en Canarias. Las barras representan el signo positivo (azul) o negativo (rojo) y la magnitud (longitud) del residual tipificado corregido de cada clase de condición respecto a cada tipo de cubierta. Los casos no significativos están en blanco.



5.4. Discusión y conclusiones

El objetivo principal de relacionar el Mapa de Condición de la Tierra con una síntesis del Mapa Forestal de España (MFE1000) fue obtener caracterizaciones fisionómicas de las cubiertas vegetales que se asocian normalmente con las clases de condición. En este sentido, la información contenida en el MFE1000 ha tenido gran relevancia, ya que permitió dividir el territorio en unidades disjuntas descritas en términos de vegetación, y no de flora o usos del suelo. Además, dichas unidades representan clases y no descripciones individuales de cada mancha, lo que permitió el uso de contrastes estadísticos para establecer las relaciones detectadas.

Los resultados obtenidos tienen un uso inmediato como clave para interpretar con propiedad consultas hechas al mapa de condición. Así, cuando se examine la frecuencia de clases de condición en cierto ámbito, sea el estado español o una comunidad autónoma, será posible discernir cómo es la vegetación que se encuentra asociada a cada clase. Ello elimina incertidumbres y suposiciones, y permite un uso operativo del mapa de condición. El objetivo principal puede, por tanto, considerarse cumplido.

Además, el MFE1000 es un producto independiente que ha movilizó grandes esfuerzos para dotarlo de interpretación y validación propias. Creemos que a causa de ello, el ejercicio realizado aquí tiene dos beneficios adicionales que no eran completamente previsibles.

El primero es una validación adicional del mapa de condición de la tierra. En todos los análisis realizados, la ordenación de las formaciones vegetales que han sido determinadas para cada estado de condición, según la escala de explotación-madurez implicada en 2dRUE, conduce a series de vegetación explicables en términos evolutivos de una sucesión ecológica.

Dos ejemplos. Primero, en el análisis realizado examinando tipos detallados de vegetación en Canarias (Sección 5.3.3), los estados de *Anomalías de bajo rendimiento* y *Basal* resultan asociados con vegetación intrazonal cuyos factores limitantes son configuraciones físico-químicas locales y no el clima. A partir de ellas, se observa un incremento en porte, complejidad y densidad de las formaciones asociadas a *Degradado* (matorral bajo) hasta *Referencia* (bosques y arboledas). Más allá de la escala, las *Anomalías de alto rendimiento* aparecen asociadas a mosaicos forestal-agrícolas, que constituyen un tipo dominante de agricultura en ese territorio y reciben por ello esfuerzo y agua suplementarios para mantener su productividad. Naturalmente, hay tipos de vegetación que aparecen varias veces dentro de dicha ordenación, pero el patrón sigue siendo cierto. De manera más general, el segundo ejemplo concierne a todo el estado español con tipos mucho menos detallados de vegetación (Sección 4.1). De nuevo, el patrón de una sucesión lineal idealizada se encuentra tras los tipos de vegetación asociados. En este nivel no se consideró la vegetación intrazonal, y en general la agricultura se sitúa en las clases más simplificadas, pero distinguiéndose del estado *Degradado*. Esto tiene sentido en términos ecológicos, y confirma la validación suplementaria del mapa de condición basada en el MFE1000.

El segundo beneficio es que, tratándose de dos productos independientes con sus propias validaciones, la interpretación hecha hasta ahora puede invertirse. Es decir, los tipos de vegetación contenidos en el MFE1000 pueden ser examinados en términos de condición. El mejor ejemplo son los bosques y arboledas, los cuales aparecen siempre con asociación mayoritaria a estados *Maduro* o de *Referencia*, pero también aparecen bajo estados diversos de mayor degradación, lo que confirma que muchos de ellos no están en condición óptima o no dan el rendimiento esperado (por ejemplo, repoblaciones con frondosas exóticas en clima más seco de España peninsular, Sección 4.3.1). Probablemente el uso de las tendencias resulta especialmente útil aquí. Así, hay bosques que resultan *Degradándose* en varios análisis, probablemente a causa de incendios forestales ocurridos en la segunda mitad del período, y formaciones adhesionadas que están mayoritariamente *Fluctuando* o *Estáticas* (Sección 4.3.1), lo que sugiere problemas de regeneración. Esta aproximación es extraordinariamente útil, si bien excede el ámbito temático de este trabajo.



6. Resultados

6.1. Continuidad de la serie temporal de NDVI

La Figura 6.1 y la Tabla 6.1 muestran la fiabilidad del mapa para las tres aplicaciones realizadas, tras aplicar la solución técnica descrita en la Sección 3.4. El impacto de la solución es importante, extendiendo la capacidad diagnóstica a todo el territorio sin alterar los resultados obtenidos para las zonas con serie temporal continua. El índice de fiabilidad permite graduar la confianza depositada en los valores.

Figura 6.1. Fiabilidad del Mapa de Condición de la Tierra (2000-2010) según huecos en la serie temporal SPOT-Vegetation S1. Datos en porcentaje de cobertura durante el período de referencia. Sistemas de referencia EPSG 25830 (Península y Baleares) y EPSG 4083 (Canarias). Las escalas relativas son aproximadas.

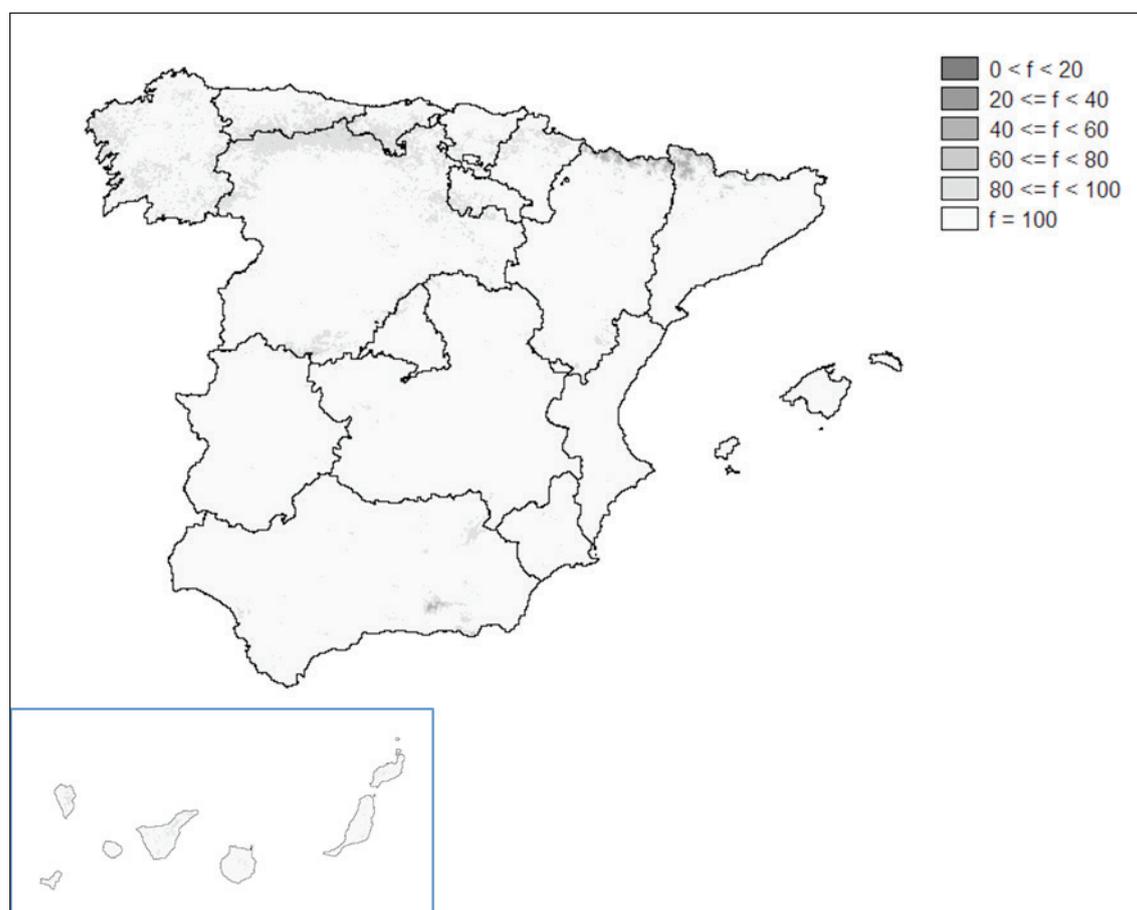


Tabla 6.1. Distribución de la fiabilidad del análisis en España, por aplicaciones territoriales. Los valores de superficie proceden de corregir los píxeles asociados según su latitud.

Aplicación	Intervalo de fiabilidad f	N.º píxeles	N.º píxeles acumulados	Superficie (km ²)	Superficie acumulada (km ²)
Península	$0 < f < 20$	0	0	0	0
	$20 \leq f < 40$	21	21	15	15
	$40 \leq f < 60$	1.571	1.592	1.160	1.175
	$60 \leq f < 80$	2.732	4.324	2.022	3.197
	$80 \leq f < 100$	41.945	46.269	31.019	34.216
	$f = 100$	599.962	646.231	457.755	491.970
Baleares	$0 < f < 20$	0	0	0	0
	$20 \leq f < 40$	0	0	0	0
	$40 \leq f < 60$	0	0	0	0
	$60 \leq f < 80$	0	0	0	0
	$80 \leq f < 100$	43	43	33	33
	$f = 100$	6.410	6.453	4.941	4.974
Canarias	$0 < f < 20$	0	0	0	0
	$20 \leq f < 40$	0	0	0	0
	$40 \leq f < 60$	0	0	0	0
	$60 \leq f < 80$	0	0	0	0
	$80 \leq f < 100$	691	691	608	608
	$f = 100$	7.787	8.478	6.855	7.463

El procedimiento permite recuperar casi 32.000 km² (Figura 6.1). La aplicación peninsular fue la más compleja, presentando la mayor incidencia de casos con baja fiabilidad. Su distribución confirma que las áreas montañosas son las más problemáticas, debido a la presencia frecuente de nubes y/o nieve. Las mayores cantidades de huecos se presentan en los Pirineos y Sierra Nevada y, en menor medida, en la Cordillera Cantábrica y Sistemas Ibérico y Central. No obstante, no existen píxeles con fiabilidad inferior al 20%, menos del 0,01% de los píxeles presenta una fiabilidad inferior al 80%, y el 92,84% de los píxeles tiene una fiabilidad del 100%.

En el caso de Baleares, la fiabilidad es muy alta y sólo presenta incidencias en el 0,7% de los píxeles, siempre por encima del 80%. La mayoría de ellos se encuentra en la Sierra de Tramontana.

Las Islas Canarias presentaron huecos en el 8,2% de los píxeles, aunque la fiabilidad en ningún caso es inferior al 80%. Estas incidencias afectan a casi todas las islas con la notable excepción de La Gomera, y en general están asociadas a zonas de topografía abrupta y elevada.

6.2. Dominio CNULD

Las definiciones de CNULD sobre desertificación y degradación de tierras incluyen una referencia precisa a ‘áreas áridas, semiáridas y sub-húmedo secas’, el conjunto de las cuales es considerado como el dominio climático donde opera la desertificación. Esas denominaciones obedecen a una clasificación por intervalos irregulares del índice de aridez usado por FAO/UNEP (UNEP, 1992), que se formula como la razón entre precipitación y evapotranspiración potencial.

El archivo climático sobre el que se apoya el Mapa de Condición de la Tierra contiene todas las variables necesarias para calcular ese índice de aridez (Secciones 2.2 y 3.1), lo que permite una identificación operativa del dominio CNULD en España durante el período de estudio (Figura 6.2 y Tabla 6.2), sin perjuicio de la que pueda derivarse oficialmente por otros organismos como la Agencia Estatal de Meteorología.

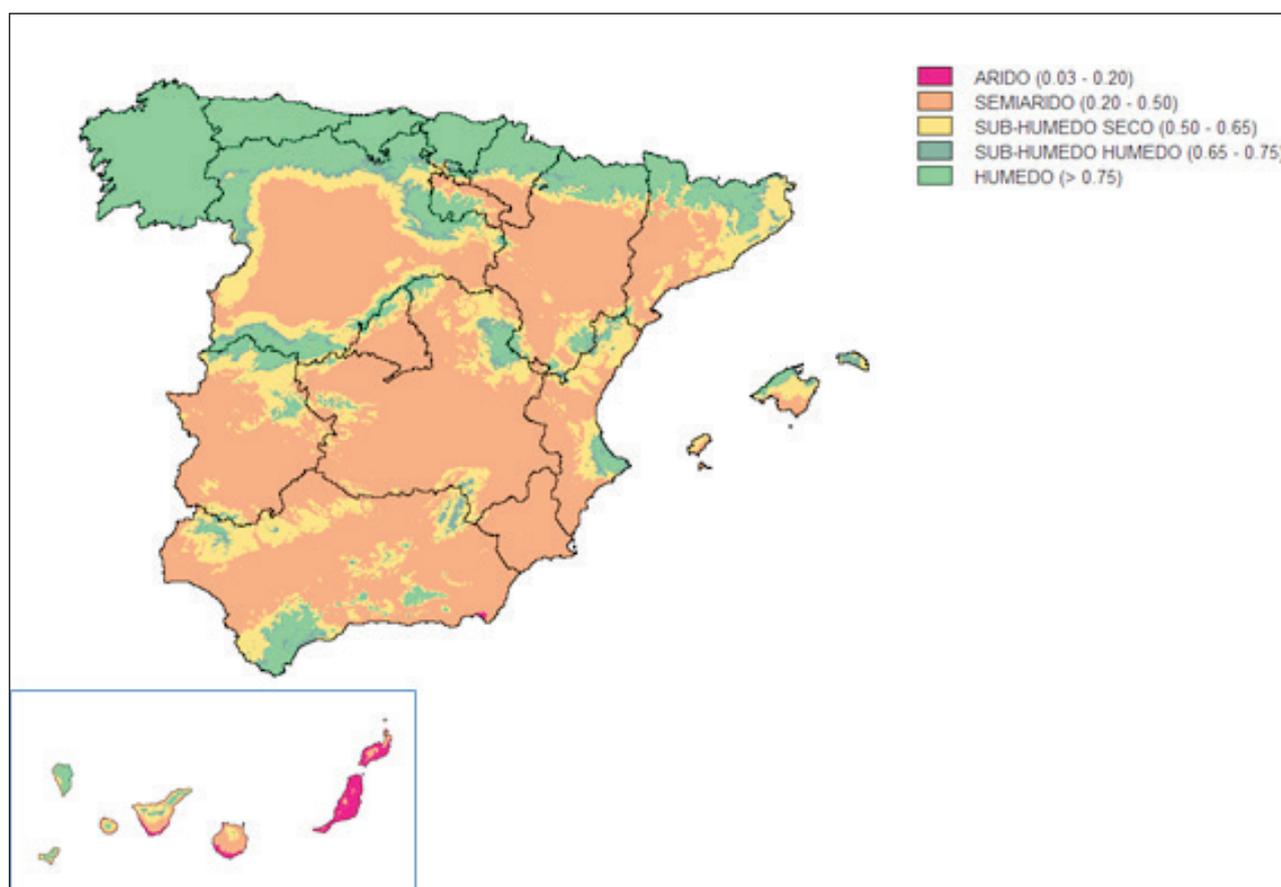


Figura 6.2. Zonas de aridez FAO/UNEP en España (2000-2010). Sistemas de referencia EPSG 25830 (Península y Baleares) y EPSG 4083 (Canarias). Las escalas relativas son aproximadas.

Tabla 6.2. Distribución de zonas de aridez FAO/UNEP por comunidades autónomas en España (2000-2010). Datos en km² y en porcentaje respecto a la superficie total.

NUTS-2	Comunidad	Árido	Semiárido	Sub-húmedo seco	Sub-húmedo húmedo	Húmedo	Total dominio CNULD	Total
11	Galicia	0	0	2	238	29.326	2	29.566
12	Asturias	0	0	0	0	10.579	0	10.579
13	Cantabria	0	0	0	128	5.173	0	5.301
21	País Vasco	0	111	309	218	6.525	420	7.163
22	Navarra	0	3.159	1.065	615	5.525	4.224	10.364
23	La Rioja	0	2.111	903	363	1.678	3.014	5.055
24	Aragón	0	32.320	5.729	2.502	7.160	38.049	47.711
30	Madrid	0	5.898	1.299	258	558	7.197	8.013
41	Castilla y León	0	45.092	19.373	7.972	21.735	64.465	94.172
42	Castilla La Mancha	0	62.720	12.331	2.442	1.952	75.051	79.445
43	Extremadura	0	29.353	8.244	1.799	2.258	37.597	41.654
51	Cataluña	0	13.546	8.972	2.806	6.781	22.518	32.105
52	Valencia	0	13.450	6.999	1.791	1.043	20.449	23.283
53	Baleares	0	1.270	2.110	766	690	3.380	4.836
61	Andalucía	91	59.944	18.681	4.128	4.671	78.716	87.515
62	Murcia	0	11.252	48	3	0	11.300	11.303
70	Canarias	2.580	2.498	1.194	411	744	6.272	7.427
	Total	2.671	282.724	87.259	26.440	106.398	372.654	505.492
	Total (%)	0,53%	55,93%	17,26%	5,23%	21,05%	73,72%	

Los datos de la Tabla 6.2 están condicionados por la resolución espacial y proyección a los sistemas de referencia finales de las diferentes capas de datos necesarios para extraerlos (la última columna puede servir de control sobre este problema mediante su comparación con las cifras oficiales de superficie de cada comunidad autónoma). No obstante, dan una idea bastante precisa de la extensión del dominio potencial climático para la desertificación en España.

En conjunto, el 74% del territorio español es susceptible de desertificación por razones climáticas. La clase más frecuente es el Semiárido (56% del total), debido a su extensión por ambas mesetas y las principales depresiones tectónicas de la Península. El Sub-húmedo seco (17%) forma, en general, estrechas bandas de transición en las estribaciones de las principales cadenas montañosas de la Península, y también se encuentra en niveles

culminares del archipiélago canario. El Árido apenas penetra en la Península por el sureste, donde da lugar a la zona más árida del continente europeo, pero se encuentra ampliamente distribuido por el oriente de Canarias. Aun así, ocupa menos del 1% del territorio.

La relación entre zonas de aridez y mesoformas de relieve no es trivial por dos razones. Primera, las zonas donde domina el clima Semiárido en España tienden a ser llanas y continuas en el espacio, lo que ha favorecido históricamente su ocupación humana. Y segunda, los ecosistemas y poblaciones de zonas semiáridas son los más vulnerables a la pérdida de servicios ecológicos. Esto es debido a encontrarse justo en medio del gradiente de aridez, donde tanto la presión humana como la sensibilidad a la degradación ecológica alcanzan valores intermedios pero operan en sinergia (Safriel and Adeel, 2005). Eso, respecto a los promedios. En cuanto a variabilidad climática, las pendientes suaves y extensas donde se encuentra el semiárido español son susceptibles de acusarla en gran medida debido al peso que tiene la altitud en las variables que controlan la aridez.

Las comunidades autónomas que tienen mayor superficie potencialmente afectada por desertificación son, por orden, Andalucía, Castilla – La Mancha y Castilla y León, que también tienen la mayor extensión de Semiárido. Todas ellas son relativamente grandes y sus límites comprenden una variedad de ambientes y paisajes, entre los que las áreas potencialmente afectadas son, sin embargo, dominantes. Pero en términos relativos, las comunidades autónomas con mayor susceptibilidad climática a la desertificación son, por orden, Murcia (prácticamente el 100% se encuentra en el dominio CNULD), Castilla – La Mancha (95%) y Extremadura (90%).

6.3. Variación del RUE observado frente a la aridez

2dRUE fue ejecutado en tres aplicaciones territoriales para mantener la coherencia en las respuestas de la vegetación dentro de ambientes dispares: el continental (España peninsular) y los insulares (Baleares y Canarias). La Figura 6.3 muestra el gráfico de dispersión entre los RUE observados medio y extremo y sus correspondientes índices de aridez. Estos datos son los usados para definir la componente de Estados. Los RUE relativos fueron calculados respectivamente usando las funciones mostradas (ver también Tabla 6.3). Posteriormente, las clases básicas de estados (*ABR*, *BA*, *RANGO*, *REF* y *AAR* en la Figura 6.3) fueron definidas usando los intervalos de confianza de las funciones aplicadas al RUE medio (Figura 6.3, izda.). Finalmente, la clase central fue subdividida según umbrales de biomasa (RUE relativo medio) y productividad (RUE relativo extremo). Los umbrales para ello se corresponden con las respectivas medianas del RUE relativo a través de esta clase.

En este proceso, no fue posible realizar un ajuste propio para Baleares, debido a que su pequeño tamaño resultaba en pocos puntos a la resolución de trabajo, lo que daba lugar a una gran dispersión. Por ello, las funciones envolventes ajustadas para España peninsular fueron aplicadas en este caso.

Los resultados experimentales muestran un incremento logarítmico del RUE medio sobre la Aridez. Este incremento es muy rápido en áreas húmedas y sub-húmedas, se aplanan en la zona sub-húmedo seca, para finalmente pasar a ser lineal en el semiárido y árido. Este resultado es coherente con el encontrado por (Huxman et al., 2004) sobre la convergencia a un RUE común máximo a través de diferentes biomas en periodos secos.

Figura 6.3. Eficiencia en el Uso de la Lluvia (RUE) en España (2000-2010), calculada como la media interanual de todo el período (izquierda), y para el período de 6 meses antecedente al mes en que se detectó el máximo NDVI de cada localización (derecha). Las funciones envolventes ajustadas a las nubes de puntos de RUE observado frente a aridez (izquierda: RUE_{OBS_me} vs. AI_{OBS_me} ; derecha: RUE_{OBS_ex} vs. AI_{OBS_ex}) definen los límites potenciales del RUE esperado para un nivel de aridez dado. Solo se usaron localizaciones que reciben toda su agua en forma de precipitación. El RUE relativo se calcula entonces para cada localización del área de estudio como la posición del RUE observado respecto a dichos límites. Los intervalos de confianza de las funciones de contorno definen los cinco estados básicos: Anomalia de bajo rendimiento (ABR), Basal (BA), Rango, Referencia (REF) y Anomalia de alto rendimiento (AAR). El Rango es posteriormente subdividido según las medianas de los RUE relativos correspondientes.

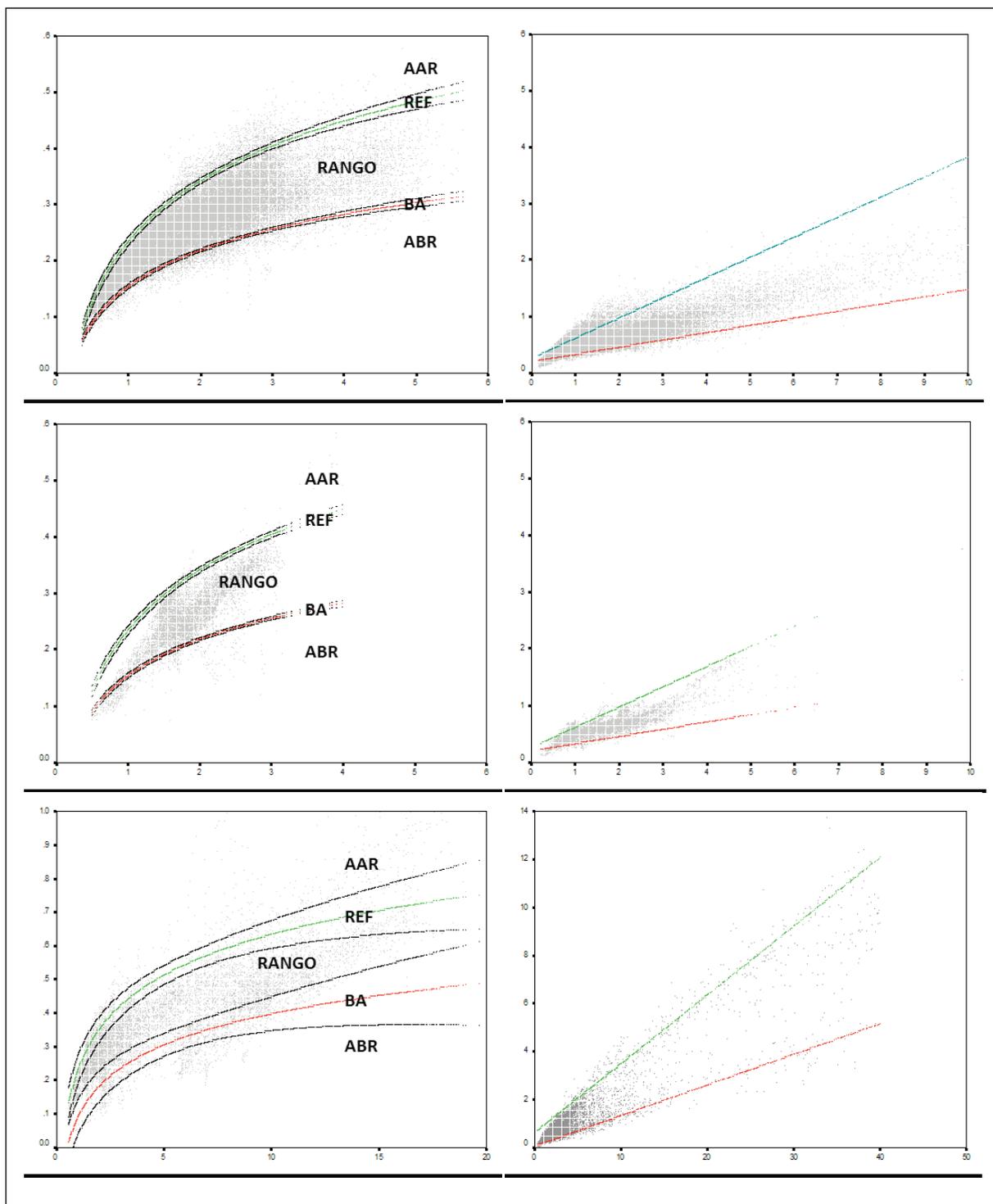


Tabla 6.3. Parámetros de las funciones envolventes ajustadas a los percentiles inferior y superior de RUE observado sobre aridez. $RUE_{EXP_me_p\%}$: RUE medio esperado para el percentil $p\%$; $RUE_{EXP_ex_p\%}$: RUE extremo esperado para el percentil $p\%$; AI_{OBS_me} : índice de aridez medio observado; AI_{OBS_ex} : índice de aridez extremo observado; p : significación del ajuste.

Aplicación	Y	X	Modelo	b0	b1	p
España peninsular	$RUE_{EXP_me_05\%}$	AI_{OBS_me}	$Y=b_0+b_1 \cdot \ln(X)$	0,1545	0,0926	<10E-4
Baleares	$RUE_{EXP_me_95\%}$	AI_{OBS_me}	$Y=b_0+b_1 \cdot \ln(X)$	0,2351	0,1544	<10E-4
	$RUE_{EXP_ex_05\%}$	AI_{OBS_ex}	$Y=b_0+b_1 \cdot X$	0,2006	0,1279	<10E-4
	$RUE_{EXP_ex_95\%}$	AI_{OBS_ex}	$Y=b_0+b_1 \cdot X$	0,2609	0,3572	<10E-4
Canarias	$RUE_{EXP_me_10\%}$	AI_{OBS_me}	$Y=b_0+b_1 \cdot \ln(X)$	0,0910	0,1333	<10E-4
	$RUE_{EXP_me_90\%}$	AI_{OBS_me}	$Y=b_0+b_1 \cdot \ln(X)$	0,2320	0,1748	<10E-4
	$RUE_{EXP_ex_10\%}$	AI_{OBS_ex}	$Y=b_0+b_1 \cdot X$	0,0663	0,1273	<10E-4
	$RUE_{EXP_ex_90\%}$	AI_{OBS_ex}	$Y=b_0+b_1 \cdot X$	0,6487	0,2860	<10E-4

6.4. Condición de la tierra en España

La Figura 6.4 muestra el mapa de condición de la tierra (Ver impresiones en tamaño A3 y A1 en el Anejo de Cartografía). Las consultas y contrastes que pueden derivarse de él son complejas, por lo que serán abordadas por pasos sucesivos: distribución de estados, distribución de tendencias, y relaciones entre estados y tendencias.

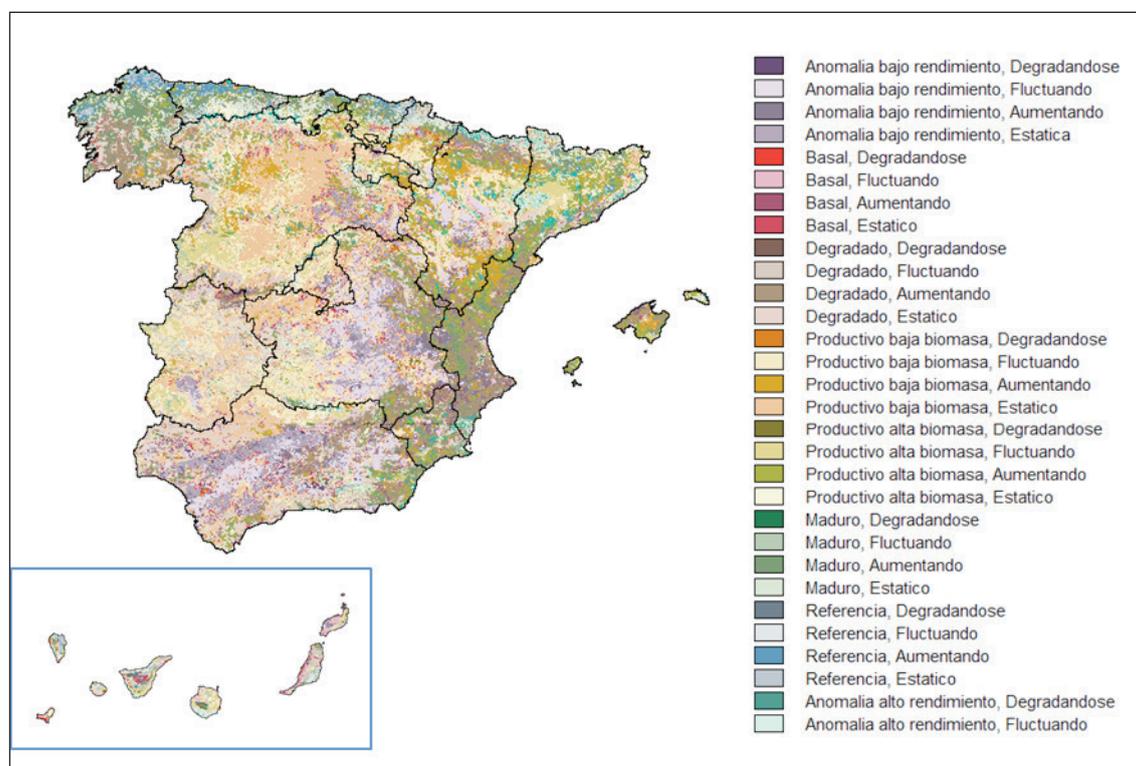


Figura 6.4. Condición de la tierra en España (2000-2010). Sistemas de referencia EPSG 25830 (Península y Baleares) y EPSG 4083 (Canarias). Las escalas relativas son aproximadas.

6.4.1. Estados

El 20% del territorio español se encuentra *Degradado*, con valores relativamente bajos tanto de productividad como de biomasa (Tabla 6.4). Un 30% adicional es terreno *Productivo con baja biomasa*. En el extremo opuesto, los estados de mayor grado de madurez ecológica (*Productivo con alta biomasa*, *Maduro* y *Referencia*) suman conjuntamente sólo el 30%. Estas cantidades se encuentran hasta cierto punto condicionadas por el método estadístico asociado al *2dRUE*, pero: i) el procedimiento es simétrico en su detección de estados; y ii) ese control es inicial y se diluye considerablemente durante todo el proceso de valoración. Por ello, cabe concluir que los estados simplificados, o simplemente degradados en sentido amplio, son claramente dominantes.

Esa conclusión inicial se ve reforzada por la asimetría en la distribución de anomalías. Las *Anomalías de alto rendimiento* ocupan un 2% del territorio, como cabría esperar de valores atípicos que son. En general, se trata de ecosistemas que reciben agua procedente de otras fuentes que la precipitación, como por ejemplo cultivos en regadío. Sin embargo, las *Anomalías de bajo rendimiento* alcanzan el 14%. En este caso, suele tratarse de ecosistemas extraordinariamente simplificados, bien por explotación agrícola o por encontrarse en estados terminales de degradación.

Tabla 6.4. Distribución de estados de condición de la tierra en España por comunidades autónomas (2000-2010). Datos en km² y en porcentaje respecto a la superficie total. Las celdas resaltadas en azul indican residuales positivos significativos en un análisis de chi-cuadrado realizado con una muestra aleatoria-estratificada de puntos ($\chi^2 = 66583.186$, d.f. = 112, N = 131502, $p < 10E-3$).

Comunidad	Anom. bajo rendim.	Basal	Degrad.	Prod. baja biom.	Prod. alta biom.	Maduro	Refer.	Anom. alto rendim.	Total
Galicia	336	494	10.865	1.649	1.894	11.025	3.198	105	29.566
Asturias	38	31	789	164	2.275	4.410	2.532	340	10.579
Cantabria	33	26	404	109	1.845	2.141	559	184	5.301
País Vasco	207	216	626	765	1.842	2.335	1.142	30	7.163
Navarra	588	348	968	3.916	1.272	2.469	698	105	10.364
La Rioja	91	108	599	2.233	1.552	265	132	75	5.055
Aragón	6.496	2.351	5.594	18.237	7.888	3.392	1.185	2.568	47.711
Madrid	1.174	422	598	3.308	1.987	467	42	15	8.013
Castilla y León	4.840	2.925	10.791	48.025	18.712	6.101	1.601	1.177	94.172
Castilla-La Mancha	23.337	5.674	10.937	27.386	6.225	5.745	121	20	79.445
Extremadura	2.165	1.079	10.667	20.384	4.693	2.642	15	9	41.654
Cataluña	607	213	3.628	4.563	11.954	5.901	2.081	3.158	32.105
Valencia	2.995	911	9.383	2.425	2.735	4.220	264	350	23.283
Baleares	334	166	1.283	951	1.320	713	40	29	4.836
Andalucía	26.951	5.686	26.742	17.409	5.081	4.626	461	559	87.515
Murcia	1.118	690	4.193	1.403	1.067	2.228	270	334	11.303
Canarias	332	1.258	1.004	1.006	1.412	762	1.288	365	7.427
Total	71.642	22.598	99.071	153.933	73.754	59.442	15.629	9.423	505.492
Total (%)	14%	4%	20%	30%	15%	12%	3%	2%	100%

La exposición de resultados por comunidades autónomas puede facilitarse identificando los estados que muestran asociación positiva para cada una de ellas (Tabla 6.4, cantidades en azul; ver también Mapa de Estados en el Anejo Cartográfico). Dichas asociaciones se interpretan como desviaciones respecto a la frecuencia que el estado en cuestión tendría en esa comunidad autónoma si sólo dependiese proporcionalmente de su frecuencia en toda España y de la extensión de la comunidad. En breve, los números en azul indican combinaciones que son más frecuentes o extensas de lo que cabría esperar por puro azar, mientras que los números en negro reflejan justo lo contrario.

Además, la interpretación de estos resultados se hace a la luz de las relaciones encontradas entre el mapa de condición y el MFE1000, especialmente en el nivel de comunidades autónomas (Sección 5.2).

Las comunidades del noroeste peninsular (Galicia, Asturias y Cantabria) siguen un patrón común, que se define por la prevalencia de estados ecológicos avanzados excepto en el caso de Galicia, que es la única en la zona norte que muestra una presencia significativa del estado *Degradado*, el cual afecta a vegetación forestal mayor de 7 m. Este patrón continúa hacia el noreste (País Vasco, Navarra, La Rioja y Aragón) con una presencia significativa pero decreciente de los estados *Maduro* y de *Referencia* y aumento de peso de los estados *Productivos*, así como con *Anomalías de alto rendimiento*, que en Aragón están claramente vinculadas a regadíos. Aragón, además, tiene extensiones considerables en estado *Basal*, asociadas con vegetación agrícola y probablemente relacionadas con regadíos en declive o abandonados.

El centro peninsular (Castilla y León, Castilla – Mancha y Extremadura) carece de asociación con los estados *Maduro* y de *Referencia*. De ellas, sólo Castilla y León muestra abundancia de terrenos *Productivos con alta biomasa*, que se relacionan con vegetación forestal mayor de 7 m. Castilla – La Mancha tiene extensiones importantes de *Productivo con baja biomasa* relacionadas con vegetación natural de menos de 7 m, y de estados *Basal* y *Anomalías de bajo rendimiento*. Estos dos últimos siempre ocurren en vegetación agrícola y por tanto cabe suponer que están relacionados con regadíos y sus abandonos sucesivos. El caso de Extremadura refleja usos más extensivos, que se asocian con estados *Productivo de baja biomasa* y *Degradado*. Resulta particularmente llamativa la falta de asociación con estados más evolucionados en esta comunidad.

La zona este (Cataluña, Valencia y Baleares) es heterogénea. Cataluña muestra una inclinación significativa hacia los estados de mayor madurez y rendimiento: *Productivo de alta biomasa*, *Maduro* y *Referencia* están allí asociados con vegetación forestal de porte creciente, mientras que las *Anomalías de alto rendimiento* lo están con vegetación agrícola intensamente manejada. Sin embargo, tanto Valencia como Baleares tienen extensiones significativas de terrenos en el rango de *Degradados* a *Maduros*, lo que refleja combinaciones entre vegetación natural y mosaicos de uso y abandono.

El sur peninsular (Andalucía y Murcia) es extraordinariamente heterogéneo. Andalucía exhibe un claro sesgo hacia tierras degradadas en general, y el nivel más elevado en esta escala con el que tiene asociación es el *Degradado*, que afecta sobre todo a vegetación natural de cualquier porte. Sin embargo, Murcia muestra relaciones de mayor variabilidad, con *Basal* (vegetación agrícola) y *Degradado* (vegetación agrícola y natural de bajo porte) en un extremo, y *Maduro*, *Referencia* y *Anomalías de alto rendimiento* en el otro, en las cuales la vegetación forestal mayor de 7 m es frecuente.

Finalmente, Canarias muestra asociaciones positivas en el intervalo de *Productivo con alta biomasa* (vegetación agrícola) a *Referencia* (vegetación forestal mayor de 7 m). También tiene extensiones relevantes de *Anomalía de alto rendimiento*, asociadas a vegetación agrícola pura y mosaicos forestal-agrícolas, y estado *Basal*, que en gran medida está formado por vegetación intrazonal ajena a la gestión.

6.4.2. Tendencias

La observación más importante que resulta de inspeccionar las tendencias ecológicas (Tabla 6.5; ver también Mapa de Tendencias en el Anejo Cartográfico) es la baja incidencia de terreno que se encuentra *Degradándose* (1%). Esto es coherente con resultados obtenidos aplicando el mismo método a otras áreas tales como el Magreb, el Sahel, la Península Ibérica (1989-2000), NW Brasil y Portugal (1989-2000 y 2000-2011), todos ellos por

debajo del 2%. Los casos más extremos de degradación activa durante la pasada década fueron encontrados en la IV Región de Chile (4%), Palestina (16%) y Mozambique (19%). Es un resultado razonable, ya que las tendencias reflejan una tasa de cambio y no el estado final después de que el cambio se haya estabilizado, lo cual es objeto de la valoración de estados. Una implicación inmediata de este resultado es que las tierras con esta tendencia son muy limitadas y podrían ser abordadas inminentemente por políticas de conservación y para este fin, este mapa, puede ser una herramienta valiosa.

Desde este punto de vista, resulta interesante comprobar que la distribución de esta tendencia negativa por comunidades autónomas no es aleatoria, a pesar de su baja presencia. Los casos más significativos aparecen asociados a Madrid, Castilla – La Mancha y Andalucía, siempre sobre vegetación agrícola y Canarias, que afecta a bosques. Este último caso puede relacionarse con incendios forestales recientes.

Tabla 6.5. Distribución de tendencias de condición de la tierra en España por comunidades autónomas (2000-2010). Datos en km² y en porcentaje respecto a la superficie total. Las celdas resaltadas en azul indican asociaciones positivas significativas en un análisis de chi-cuadrado realizado con una muestra aleatoria-estratificada de puntos ($\chi^2 = 36184.134$, d.f. = 48, N = 131502, $p < 10E-3$).

Comunidad	Degradándose	Fluctuando	Aumentando	Estático	Total
Galicia	103	792	18.557	10.114	29.566
Asturias	33	203	5.557	4.786	10.579
Cantabria	17	242	2.438	2.604	5.301
País Vasco	43	1.018	3.389	2.713	7.163
Navarra	46	2.702	3.771	3.845	10.364
La Rioja	4	1.567	1.760	1.724	5.055
Aragón	193	15.270	22.098	10.150	47.711
Madrid	249	3.386	590	3.788	8.013
Castilla y León	213	23.798	19.331	50.830	94.172
Castilla-La Mancha	1.410	30.134	17.042	30.859	79.445
Extremadura	273	21.832	3.085	16.464	41.654
Cataluña	183	6.036	16.234	9.652	32.105
Valencia	139	1.533	20.882	729	23.283
Baleares	6	292	3.840	698	4.836
Andalucía	2.398	25.449	18.517	41.151	87.515
Murcia	74	2.749	8.174	306	11.303
Canarias	527	4.328	810	1.762	7.427
Total	5.911	141.331	166.075	192.175	505.492
Total %	1%	28%	33%	38%	100%

De las tres tendencias posibles, *Aumentando* es la que, sin embargo, domina en España, presentándose en un tercio del territorio (33%). En su mayor parte se trata de masas forestales o vegetación natural evolucionando

tras el abandono de tierras que ha experimentado el país desde su entrada en la Unión Europea. Esta interpretación se aplica directamente a las comunidades del noroeste. En general, esta tendencia es infrecuente en zonas agrícolas de cualquier comunidad autónoma.

La tendencia *Fluctuando* es la siguiente en importancia (28%) y sus asociaciones positivas se encuentran en comunidades autónomas donde el dominio climático CNULD es importante. Esta tendencia refleja simplemente respuestas activas de la vegetación a variaciones interanuales de aridez, y está presente tanto en vegetación natural o seminatural estabilizada como en cultivos de secano, pero muy raramente en vegetación natural mayor de 7 m de todo el país.

Si se compara la frecuencia conjunta de tierras con cualquier tendencia significativa con la de tierras sin tendencia alguna (*Estático*), las primeras son claramente dominantes (62% frente a 38%). Ello demuestra que la cubierta vegetal ha sido generalmente responsiva durante el período analizado, sea a la presión humana o a su evolución natural, y también que el método es suficientemente sensible como para captar esas respuestas cuando existen. La falta de tendencias tiene gran importancia territorial no obstante. La causa más inmediata es que el período puede no haber sido suficientemente largo como para que la vegetación muestre una tendencia significativa. Pero puede haber otras razones que resulten en una variación lineal nula, como un crecimiento sucedido por una perturbación abrupta. La amplia distribución de asociaciones positivas entre *Estático* y las comunidades autónomas dificulta adicionalmente la obtención de interpretaciones generales, y por ello este caso no será discutido aquí.

6.4.3. Relaciones entre estados y tendencias

Los estados y tendencias operan sobre el mismo conjunto de datos pero se trata de dos aproximaciones distintas e independientes. Por ello, resulta interesante preguntarse si existe relación entre ambos. Para responder, se realizó una prueba de chi cuadrado para todo el estado Español usando la misma red de muestreo que en casos anteriores (Tabla 6.6).

Tabla 6.6. Asociación entre estados y tendencias de condición de la tierra en España (2000-2010). Datos en km² y en porcentaje respecto a la superficie total. Las celdas resaltadas en azul indican asociaciones positivas significativas en un análisis de chi-cuadrado realizado con una muestra aleatoria-estratificada de puntos ($c^2 = 17380.230$, d.f. = 21, N = 131502, $p < 10E-3$).

	Degradándose	Fluctuando	Aumentando	Estático	Total km ²	Total%
Anom. bajo rendim.	1.841	30.487	11.427	28.021	71.776	14%
Basal	447	8.128	4.932	9.124	22.631	4%
Degradado	1.065	19.679	45.601	32.875	99.220	20%
Prod. baja biomasa	1.241	54.638	28.114	70.025	154.018	30%
Prod. alta biomasa	661	19.697	30.442	23.050	73.850	15%
Maduro	320	5.659	34.443	19.083	59.505	12%
Referencia	191	1.526	7.781	6.157	15.655	3%
Anom. alto rendim.	165	1.607	3.680	4.025	9.477	2%
Total km²	5.931	141.421	166.420	192.360	506.132	100%
Total %	1%	28%	33%	38%	100%	

El contraste resultó altamente significativo. Los siguientes hechos se derivan de la interpretación de los residuales (se indican por orden de importancia los principales tipos de cubierta vegetal asociados según la Tabla 5.4, Sección 5.1):

- La mayor incidencia de ecosistemas *Degradándose* se da en los estados de *Anomalía de bajo rendimiento* y *Basal* (vegetación agrícola en ambos casos). En menor medida, esta tendencia también se da en los estados de *Referencia* (bosques) y *Anomalía de alto rendimiento* (vegetación agrícola).
- Es frecuente que los ecosistemas que están *Fluctuando* se encuentren en estado *Productivo de baja biomasa* (vegetación natural de porte bajo o vegetación agrícola), *Anomalía de bajo rendimiento* o *Basal* (ambas, vegetación agrícola). Es relativamente raro que esta tendencia aparezca en ecosistemas *Degradados* o *Maduros*, (en cuyo caso sería vegetación natural de porte bajo).
- Los ecosistemas *Degradados* se encuentran frecuentemente *Aumentando* (bosques), pero esta tendencia se asocia en conjunto con niveles superiores de madurez ecológica (*Productivo con alta biomasa*, *Maduro*, *Referencia* y *Anomalía de alto rendimiento*), siempre en bosques.
- Por el contrario, la falta de tendencia detectable (*Estática*) es más frecuente en ecosistemas simplificados (*Productivo con baja biomasa* –vegetación natural de porte bajo y vegetación agrícola-, *Anomalías de bajo rendimiento* y *Basal* –vegetación agrícola en ambos casos-).

Esas relaciones sugieren un territorio con al menos dos dinámicas contrapuestas. Por un lado, habría extensiones importantes de vegetación agrícola que permanece estática o fluctúa interanualmente según las lluvias del año, pero que en ningún caso aumenta a lo largo del tiempo. Este resultado es lógico, y refleja tanto el tipo de cultivo (regadío o secano) como la explotación de su producción primaria neta. Sin embargo, se aprecia una retroalimentación dentro de los ecosistemas agrícolas, que muestran la mayor incidencia de degradación activa. Cabe esperar que su resultado sea sistemas agotados e improductivos en su estado terminal, cuando finalmente son abandonados y quedan con una cubierta vegetal de porte bajo y en estado ecológicamente inerte. La intensificación creciente de la agricultura y, en particular, la trayectoria que afectaría a regadíos desde su implantación sobre tierras marginales hasta su retorno a ellas, son puntos calientes de este sistema.

Por otro lado, habría superficies igualmente importantes de vegetación natural, la mayor parte de la cual ha evolucionado por sucesión ecológica secundaria tras un uso que fue abandonado por razones más de mercado que ecológicas. Los dos eventos recientes que cabe relacionar con ello son el éxodo rural experimentado a mediados del siglo pasado, y la entrada en la Unión Europea. Dicha vegetación aparece con una variedad de tipos de cubierta, pero en general el proceso de sucesión se muestra activo, como sugiere el hecho de que incluso los bosques se encuentran acumulando biomasa a lo largo del tiempo. No obstante, se detecta una cantidad significativa de bosques y otros tipos de vegetación natural degradados en todo el territorio nacional, especialmente en el sur de la Península.

La cuestión que sigue es hasta qué punto esas dinámicas están conectadas entre sí. Lo han estado tradicionalmente, cuando casi cualquier terreno aprovechable cumplía ciclos de explotación y reposo. Esos ciclos eran a veces inherentes a un sistema de uso, como los barbechos o la alternancia entre viñedos y pinares hecha en el Maresme de Cataluña. Otras veces estaban asociados a oscilaciones de mercado, como la intensidad y extensión del pastoreo. Parece que ese sistema declina ahora a favor de trayectorias separadas entre lo marginal y lo agrícola, lo cual está muy condicionado por factores socio-económicos cada vez más globales como la Política Agraria Comunitaria de la Unión Europea. La misión de este Mapa de Condición de la Tierra es facilitar la vigilancia de esa evolución.

7. Potencialidad de uso del mapa de condición de la tierra

Como se expuso en el apartado de objetivos de este documento, el objetivo principal de este mapa de condición de la tierra es dar una representación coherente de los ecosistemas terrestres, identificando estados y tendencias en términos de madurez ecológica, y con especial atención a la degradación de tierras. Pero además el mapa tiene dos objetivos asociados, uno es servir como instrumento para diagnósticos detallados sobre los que basar políticas territoriales, especialmente las relacionadas con desertificación. Y el otro es servir como prototipo metodológico para aplicaciones en España para un período posterior, o bien, aplicaciones en países diferentes. De estos objetivos se pueden deducir las potencialidades de uso del mapa.

En primer lugar debe destacarse su aplicación (para un tipo de usuario muy concreto, que es el Punto Focal Nacional de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación) como instrumento para informar a la Convención sobre el estado de la cubierta terrestre en términos de productividad.

Por otro lado, los procesos de validación e interpretación que han acompañado al proceso de elaboración del mapa han dejado entrever algunos usos potenciales, que pueden ser objeto de futuros desarrollos y de su explotación por parte de los distintos tipos posibles de usuarios. En particular:

- Análisis de los estados y tendencias, en definitiva, de la “condición” de los tipos de vegetación contenidos en el Mapa Forestal de España, profundizando en el estudio realizado de forma preliminar como herramienta para la interpretación. Las nuevas ediciones del mapa forestal de España, con una información mucho más exhaustiva sobre las formaciones vegetales, en especial de los estratos arbustivos, abren unas posibilidades excelentes para el examen de la cubierta vegetal forestal en términos de condición.
- Análisis de los estados y tendencias, en definitiva, de la “condición” de los tipos y formaciones de carácter agrario contenidos en el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España.

Otros usos potenciales a explorar:

- Análisis de la evolución de grandes incendios: Analizar el mapa de condición con una capa nacional de perímetros de incendios forestales en las últimas décadas con información sobre la fecha del incendio, y analizar las asociaciones con estados y tendencias. Estas últimas en particular pueden contribuir a la evaluación de la eficiencia de medidas aplicadas, o de las consecuencias de la ausencia de las mismas. Es obvio que la escala del mapa de condición (píxeles de 1 km²) condiciona a que su utilización preferente sea para grandes incendios.
- Estudio de la potencialidad del mapa como apoyo al estudio de la evolución de problemas fitosanitarios a gran escala de la vegetación forestal, como por ejemplo de la Seca (progresivo deterioro y muerte, fundamentalmente de encinas y alcornoques que se ha denominado Seca o decaimiento de los Quercus.)
- Análisis de los efectos de cambios de usos a gran escala.

En definitiva, el Sistema Integrado de Vigilancia y Evaluación del PAND cuenta ya con un potente instrumento de análisis, basado en técnicas de teledetección, con todas las conocidas ventajas que ello conlleva, que el Ministerio pone a disposición para la explotación de sus potencialidades.



Bibliografía

- Adeel, Z., Safriel, U., Niemeijer, D., White, R., Kalbermatten, G., Glantz, M., Salem, B., Scholes, B., Niamir-Fuller, M., Ehui, S., Yapi-Gnaore, V., 2005. Millenium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis. World Resources Institute, Washington D.C. <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.355.aspx.pdf> (Accessed January 2010).
- Albaladejo, J., Martínez-Mena, M., Almagro, M., Ruiz-Navarro, A., Ortiz, R., 2009. Factores de control en la dinámica del Carbono Orgánico de los suelos de la Región de Murcia, Congreso Internacional sobre Desertificación, 16-18 septiembre 2009, Murcia.
- Bai, Y.F., Wu, J.G., Xing, Q., Pan, Q.M., Huang, J.H., Yang, D.L., Han, X.G., 2008. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau. *Ecology* 89, 2140-2153.
- Baret, F., Bartholomé, E., Bicheron, P., Borstlap, G., Bydekerke, L., Combal, B., Derwae, J., Geiger, B., Gontier, E., Gregoire, J.M., Hagolle, O., Jacobs, T., Leroy, M., Piccard, I., Samain, O., Van Roey, T., 2006. VGT4Africa user manual. Institute for Environmental Sustainability, Ispra. http://www.vgt4africa.org/PublicDocuments/VGT4AFRICA_user_manual.pdf (Accessed March 2012).
- del Barrio, G., Puigdefabregas, J., Sanjuan, M.E., Stellmes, M., Ruiz, A., 2010. Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989-2000. *Remote Sensing of Environment* 114, 1817-1832.
- EEA, 2007. Corine land cover 2000 (CLC2000) seamless vector database. European Environment Agency, Copenhagen. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database> (Accessed January 2010).
- Garbulsky, M.F., Paruelo, J.M., 2004. Remote sensing of protected areas to derive baseline vegetation functioning characteristics. *J. Veg. Sci.* 15, 711-720.
- Glickman, T., 2000. *Glossary of Meteorology*, 2nd ed. American Meteorological Society, Boston, p. 855.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation & Drainage Division - ASCE* 108, 225-230.
- Hein, L., de Ridder, N., 2006. Desertification in the Sahel: a reinterpretation. *Glob. Change Biol.* 12, 751-758.
- Hutchinson, M.F., 1995. Interpolating mean rainfall using thin-plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems* 9, 385-403.
- Huxman, T.E., Smith, M.D., Fay, P.A., Knapp, A.K., Shaw, M.R., Loik, M.E., Smith, S.D., Tissue, D.T., Zak, J.C., Weltzin, J.F., Pockman, W.T., Sala, O.E., Haddad, B.M., Harte, J., Koch, G.W., Schwinning, S., Small, E.E., Williams, D.G., 2004. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature* 429, 651-654.
- Jarvis, C.H., Stuart, N., 2001. A comparison among strategies of interpolating maximum and minimum daily air temperatures. Part I: The selection of "guiding" topographic and land cover variables. *Journal of applied meteorology* 40, 1060-1074.
- Jobbagy, E.G., Jackson, R.B., 2000. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological Applications* 10, 423-436.
- Jobbagy, E.G., Sala, O.E., Paruelo, J.M., 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: A remote sensing approach. *Ecology* 83, 307-319.
- Jones, R.J.A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P.J., Montanarella, L., 2004. The map of organic carbon in topsoils in Europe, Version 1.2, September 2003: Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.72 (S.P.I.04.72). Report No.17 (EUR 21209 EN)
- European Soil Bureau Research, Luxembourg.

- LADA, 2006. Land Degradation Assessment in Drylands. LADA Secretariat, FAO, Rome. <http://www.fao.org/nr/lada/> (Accessed January 2010).
- LeHouerou, H.N., 1984. Rain Use Efficiency - A unifying concept in arid-land ecology. *J. Arid. Environ.* 7, 213-247.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G., 1991. World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note. Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD). International Soil Reference and Information Centre / UNEP, Wageningen. <http://www.isric.org/UK/About+ISRIC/Projects/Track+Record/GLASOD.htm> (Accessed January 2010).
- Orr, B.J., 2011. Scientific review of the UNCCD provisionally accepted set of impact indicators to measure the implementation of strategic objectives 1, 2 and 3. White Paper - Version 1. Office of Arid Lands Studies, University of Arizona, Tucson. <http://www.unccd.int/en/programmes/Science/Monitoring-Assessment/Pages/Workshop-Indicator-Refinement.aspx> (Accessed February 2012).
- Pickup, G., 1996. Estimating the effects of land degradation and rainfall variation on productivity in rangelands: An approach using remote sensing and models of grazing and herbage dynamics. *Journal of Applied Ecology* 33, 819-832.
- Pickup, G., Bastin, G.N., Chewings, V.H., 1994. Remote-sensing-based condition assessment for nonequilibrium rangelands under large-scale commercial grazing. *Ecological Applications* 4, 497-517.
- Pickup, G., Bastin, G.N., Chewings, V.H., 1998. Identifying trends in land degradation in non-equilibrium rangelands. *Journal of Applied Ecology* 35, 365-377.
- Pinto, J.M.L., 2012. Dehesas y paisajes adhesados en Castilla y León. *Revista de Geografía* 21, 179-203.
- Prince, S.D., De Colstoun, E.B., Kravitz, L.L., 1998. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Glob. Change Biol.* 4, 359-374.
- Prince, S.D., Wessels, K.J., Tucker, C.J., Nicholson, S.E., 2007. Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Glob. Change Biol.* 13, 1308-1313.
- Pulido, F., Picardo, A., 2010. Libro Verde de la Dehesa. Universidad de Cordoba, Cordoba. http://www.uco.es/integraldehesa/images/stories/doc/Jornadas/libro_verde_dehesa.pdf (Acceso junio 2010).
- Rodríguez-Murillo, J.C., 2001. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biology and Fertility of Soils* 33, 53-61.
- Ruiz, A., Sanjuan, M.E., del Barrio, G., Puigdefabregas, J., 2011. r2dRue: 2d Rain Use Efficiency library, version 1.03. R package. Comprehensive R Archive Network. <http://CRAN.R-project.org/package=r2dRue> (Accessed February 2012).
- Ruiz de la Torre, J., 2002. Memoria del Mapa Forestal de España a escala 1:1000000. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Safriel, U., Adeel, Z., 2005. Dryland Systems, in: Hassan, R.M., Scholes, R., Ash, N. (Eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group*. Island Press, pp. 625-662.
- Sanjuan, M.E., Ruiz, A., del Barrio, G., 2012. The 2dRUE tool for assessment and monitoring of land cover status. Estacion Experimental de Zonas Aridas (CSIC). http://www.eeza.csic.es/eeza/g_geo/videogeo.htm (Accessed March 2012).
- Siegel, S., Castellan, N.J., 1988. *Nonparametric Statistics for the Behavioural Sciences*, 2nd ed. McGraw-Hill, Boston.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. *Biometry*, 3 ed. W.H. Freeman and Co., New York.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, 127-150.
- Tucker, C.J., Justice, C.O., Prince, S.D., 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *Int. J. Remote Sens.* 7, 1571-1581.
- UNEP, 1992. *World Atlas of Desertification*, 2 ed. UNEP, Nairobi.
- VITO, 1998. Free VEGETATION distribution site. VITO NV, Belgium. <http://free.vgt.vito.be/> (Accessed March 2012).

**Evaluación y seguimiento
de la desertificación en España**
Mapa de la Condición de la Tierra 2000-2010

ANEXO: CARTOGRAFÍA



Índice

1. Introducción	69
2. Descripción de los sistemas de referencia	70
3. Códigos de leyenda	71
4. Relación de capas	72
5. Mapas	73
5.1. Condición de la Tierra en España (2000-2010)..	73
5.2. Condición de la Tierra en España (2000-2010): estados.	74
5.3. Condición de la Tierra en España (2000-2010): tendencias.	75
5.4. Condición de la Tierra en España (2000-2010): fiabilidad en términos de porcentaje de cobertura de la serie temporal del producto de partida SPOT-Vegetation NDVI S10.	76
5.5. Zonas de aridez en España (2000-2010) según el índice FAO-UNEP (Precipitación / Evapotranspiración Potencial	77



Introducción

Se incluye a continuación información sobre el mapa de condición de la tierra en España. Aunque se han manejado tres áreas de estudio de manera independiente (territorio peninsular, archipiélago balear y archipiélago canario), la entrega de mapas en formato digital sigue las especificaciones del Real Decreto 1071/2007. Para ello las tres áreas han sido agrupadas en dos lotes:

- El territorio peninsular y Baleares forman un lote único. Sus sistemas de referencia son coordenadas geodésicas sin proyectar (código EPSG 4326), y proyección UTM Huso 30 en el sistema ETRS89 (código EPSG 25830).
- Canarias se entrega en un lote diferente, con sistemas de referencia de coordenadas geodésicas sin proyectar (código EPSG 4326), y proyección UTM Huso 28 en el sistema REGCAN95 (código EPSG 4083).

Puede apreciarse que, en ambos lotes, las coordenadas proyectadas se han transformado a un solo Huso UTM (30 para península y Baleares, 28 para Canarias) con objeto de mantener el territorio correspondiente en una única capa.

Las imágenes en coordenadas geodésicas prevalecen en todos los casos si se detecta una incongruencia con los datos proyectados correspondientes.

Todas las imágenes están en formato GeoTIFF (.tif) junto con su fichero de georeferencia (.tfw) con objeto de facilitar la importación y preservar la paleta de color.

2. Descripción de los sistemas de referencia

EPSG: 4326
ref. system : Geodetic Coordinates (Latitude/Longitude)
projection : none
datum : WGS 1984
delta WGS84 : 0 0 0
ellipsoid : WGS84
major s-ax : 6378137.000
minor s-ax : 6356752.314
origin long : 0
origin lat : 0
origin X : 0
origin Y : 0
scale fac : 1.0
units : deg
parameters : 0
EPSG: 25830
ref. system : ETRS89 / UTM zone 30N
projection : Transverse Mercator
datum : European_Terrestrial_Reference_System_1989
delta WGS84 : 0 0 0
ellipsoid : GRS 1980
major s-ax : 6378137.000
minor s-ax : 6356752.314
origin long : -3
origin lat : 0
origin X : 500000
origin Y : 0
scale fac : 0.9996
units : m
parameters : 0
EPSG: 4083
ref. system : REGCAN95 / UTM zone 28N
projection : Transverse Mercator
datum : Red_Geodesica_de_Canarias_1995
delta WGS84 : 0 0 0
ellipsoid : GRS 1980
major s-ax : 6378137.000
minor s-ax : 6356752.314
origin long : -15
origin lat : 0
origin X : 500000
origin Y : 0
scale fac : 0.9996
units : m
parameters : 0

3. Códigos de leyenda

Fiabilidad
code 1 : $0 < f < 20$
code 2 : $20 \leq f < 40$
code 3 : $40 \leq f < 60$
code 4 : $60 \leq f < 80$
code 5 : $80 \leq f < 100$
code 6 : $f = 100$

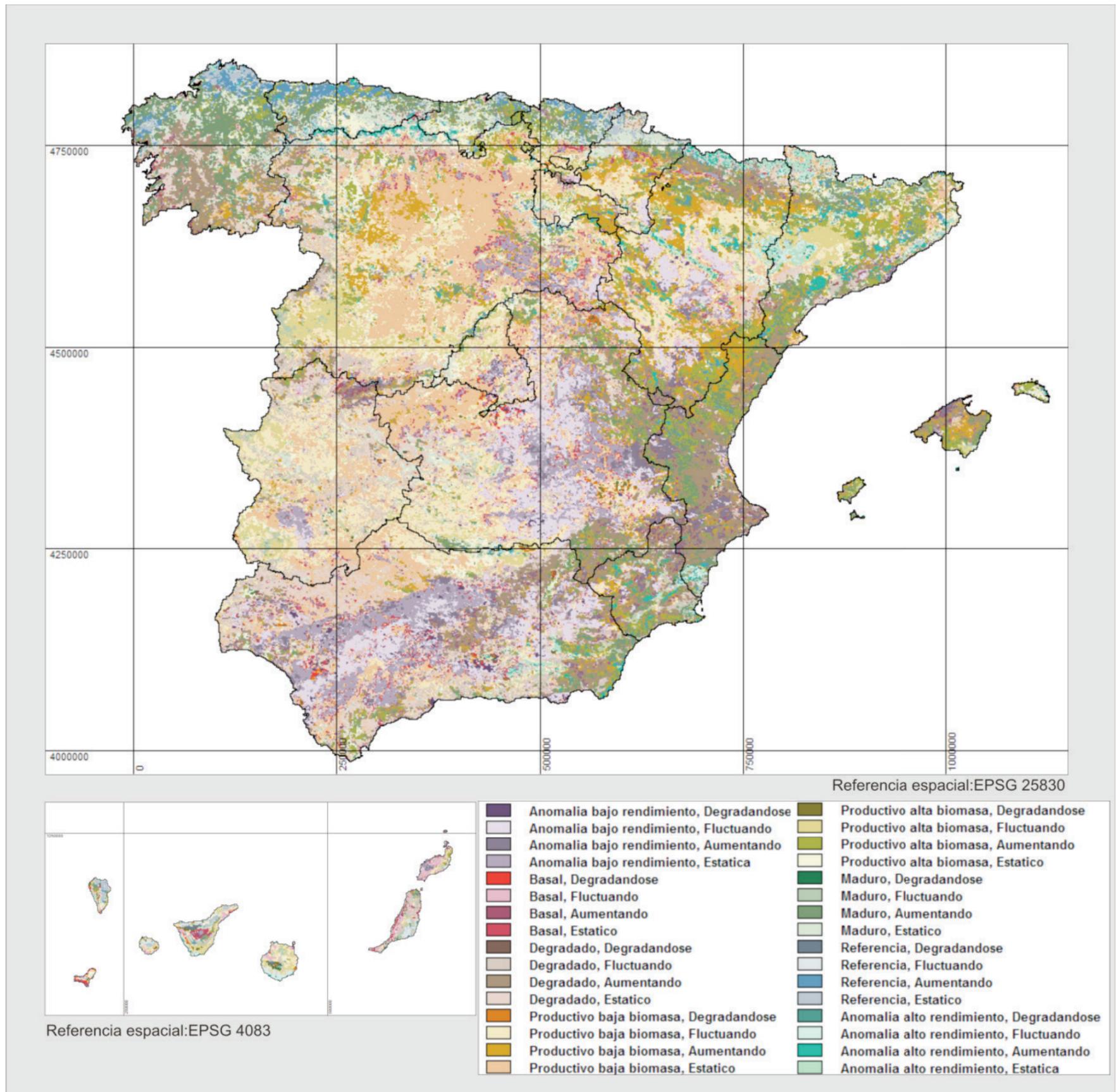
Condición
code 1 : Anomalía bajo rendimiento: Degradándose
code 2 : Anomalía bajo rendimiento: Fluctuando
code 3 : Anomalía bajo rendimiento: Aumentando
code 4 : Anomalía bajo rendimiento: Estática
code 5 : Basal: Degradándose
code 6 : Basal: Fluctuando
code 7 : Basal: Aumentando
code 8 : Basal: Estático
code 9 : Degradado: Degradándose
code 10 : Degradado: Fluctuando
code 11 : Degradado: Aumentando
code 12 : Degradado: Estático
code 13 : Productivo baja biomasa: Degradándose
code 14 : Productivo baja biomasa: Fluctuando
code 15 : Productivo baja biomasa: Aumentando
code 16 : Productivo baja biomasa: Estático
code 17 : Productivo alta biomasa: Degradándose
code 18 : Productivo alta biomasa: Fluctuando
code 19 : Productivo alta biomasa: Aumentando
code 20 : Productivo alta biomasa: Estático
code 21 : Maduro: Degradándose
code 22 : Maduro: Fluctuando
code 23 : Maduro: Aumentando
code 24 : Maduro: Estático
code 25 : Referencia: Degradándose
code 26 : Referencia: Fluctuando
code 27 : Referencia: Aumentando
code 28 : Referencia: Estático
code 29 : Anomalía alto rendimiento: Degradándose
code 30 : Anomalía alto rendimiento: Fluctuando
code 31 : Anomalía alto rendimiento: Aumentando
code 32 : Anomalía alto rendimiento: Estática

4. Relación de capas

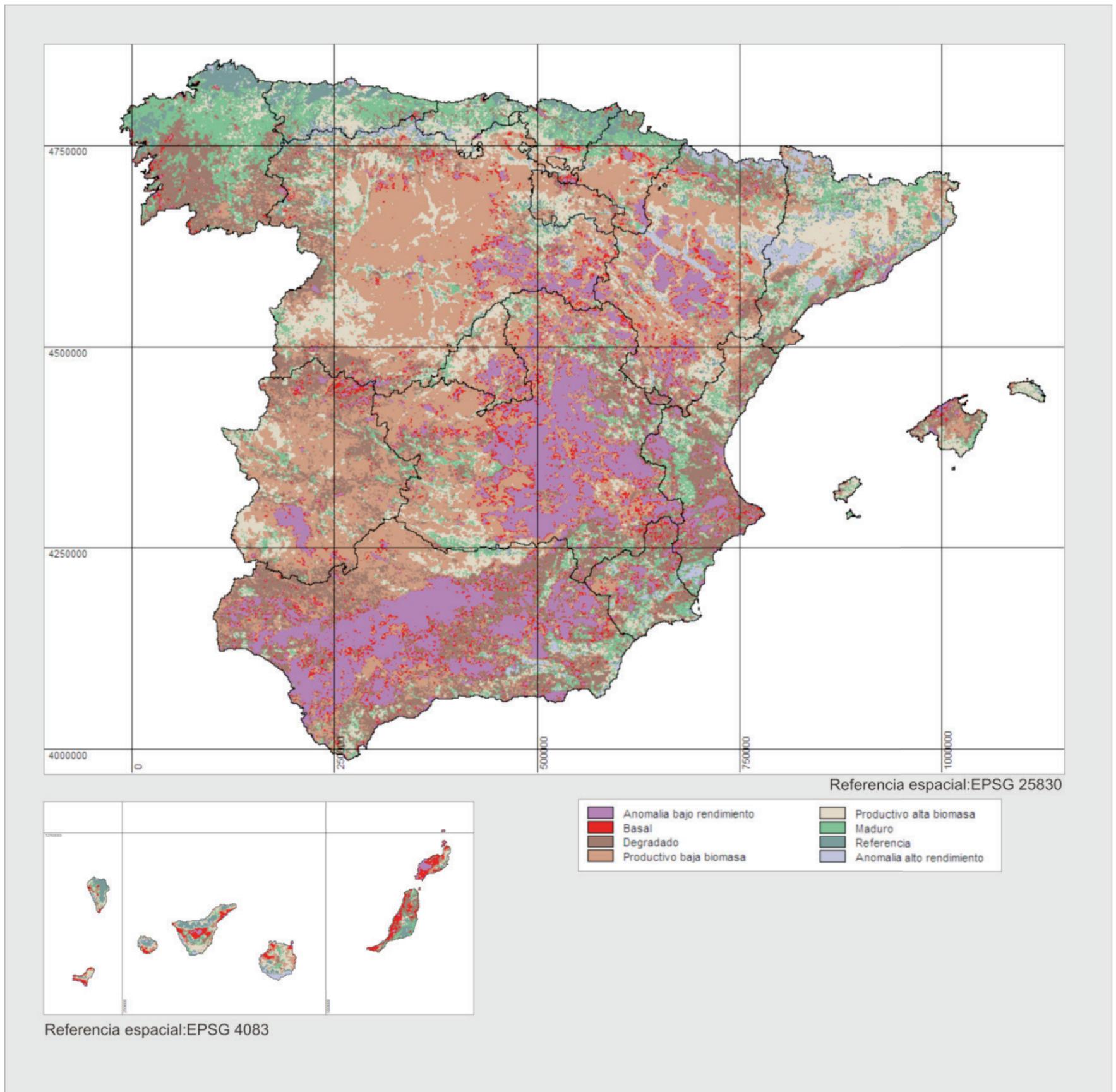
Nombre (.tif, .tfw)	Georeferencia	Descripción
ep-con-v1_EPSG4326	EPSG 4326	Península y Baleares: condición de la tierra (versión 2 península, versión 1 Baleares)
ep_fiabilidad_c_EPSG4326	EPSG 4326	Península y Baleares: fiabilidad (% de continuidad en serie temporal NDVI)
cn-con-v1_EPSG4326	EPSG 4326	Canarias: condición de la tierra (versión 1)
cn-fiabilidad_c_EPSG4326	EPSG 4326	Canarias: fiabilidad (% de continuidad en serie temporal NDVI)
ep-con-v1_EPSG25830	EPSG 25830	Península y Baleares: condición de la tierra (versión 2 península, versión 1 Baleares)
ep_fiabilidad_c_EPSG25830	EPSG 25830	Península y Baleares: fiabilidad (% de continuidad en serie temporal NDVI)
cn-con-v1_EPSG4083	EPSG 4083	Canarias: condición de la tierra (versión 1)
cn-fiabilidad_c_EPSG4083	EPSG 4083	Canarias: fiabilidad (% de continuidad en serie temporal NDVI)

5. Mapas

5.1. Condición de la Tierra en España (2000-2010).



5.2. Condición de la Tierra en España (2000-2010): estados.



5.3. Condición de la Tierra en España (2000-2010): tendencias.

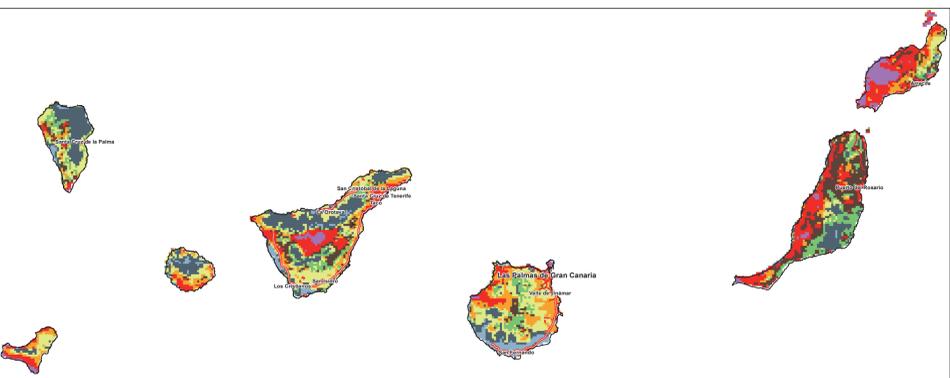
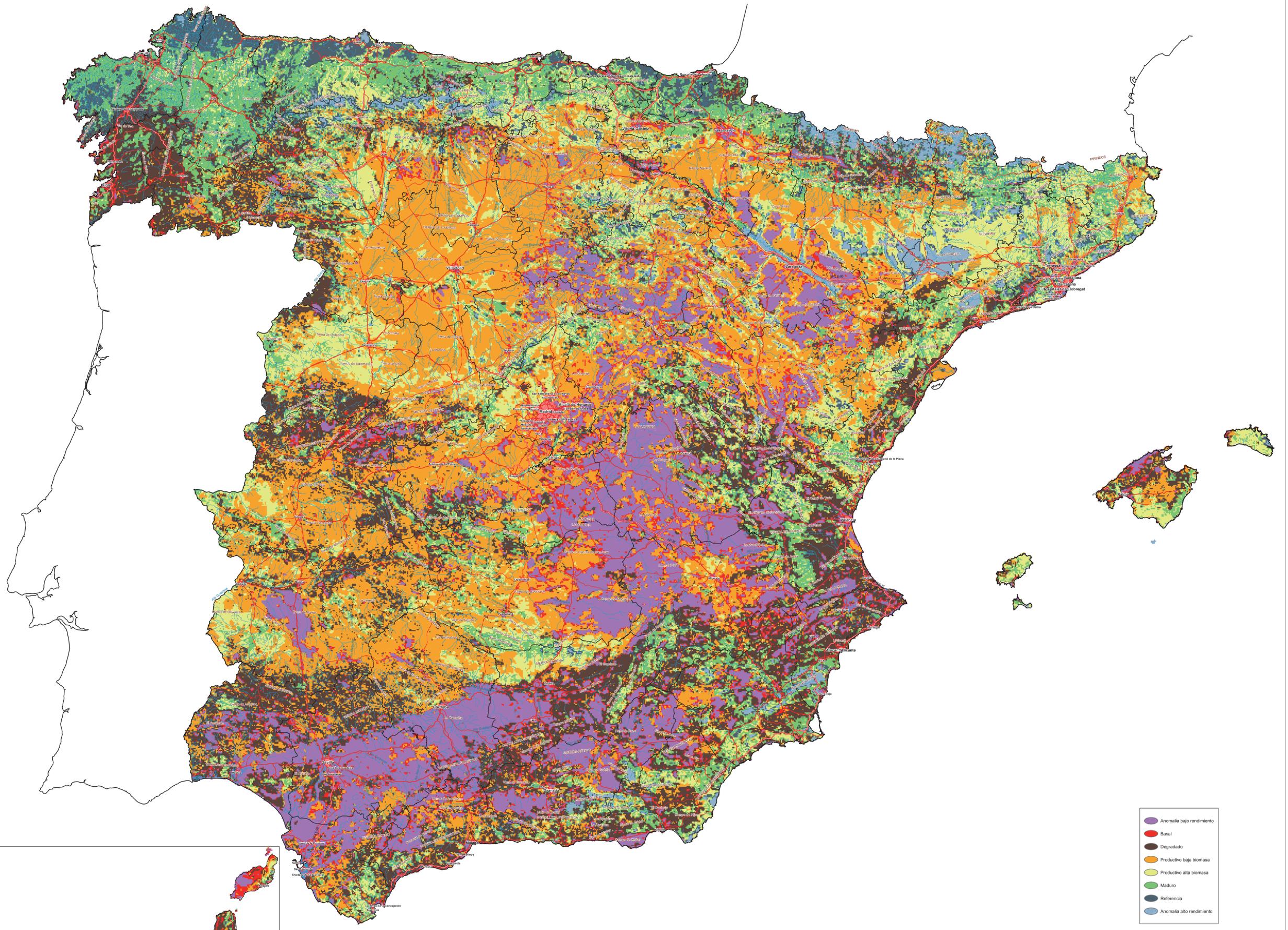


5.4. Condición de la Tierra en España (2000-2010): fiabilidad en términos de porcentaje de cobertura de la serie temporal del producto de partida SPOT-Vegetation NDVI S10.



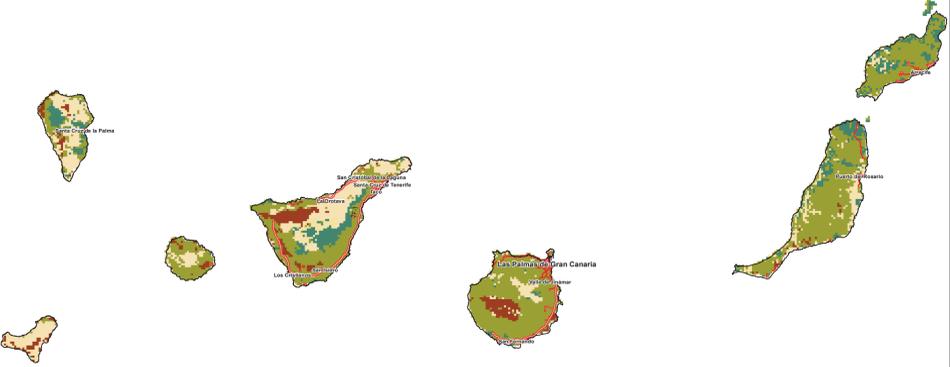
5.5. Zonas de aridez en España (2000-2010) según el índice FAO-UNEP (Precipitación / Evapotranspiración Potencial)





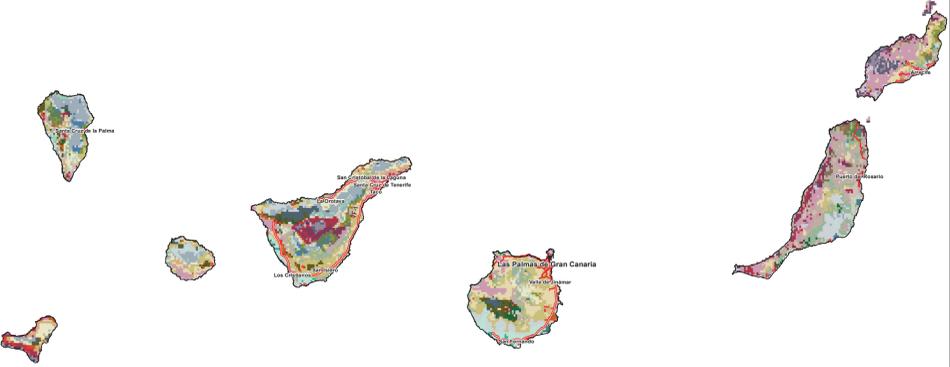
MAPA DE LA CONDICIÓN DE LA TIERRA EN ESPAÑA 2000-2010: ESTADOS JUNIO 2013





MAPA DE LA CONDICIÓN DE LA TIERRA EN ESPAÑA 2000-2010: TENDENCIAS JUNIO 2013





	Anomalia bajo rendimiento, Degradándose		Productivo alta biomasa, Degradándose
	Anomalia bajo rendimiento, Fluctuando		Productivo alta biomasa, Fluctuando
	Anomalia bajo rendimiento, Aumentando		Productivo alta biomasa, Aumentando
	Anomalia bajo rendimiento, Estática		Productivo alta biomasa, Estático
	Basal, Degradándose		Maduro, Degradándose
	Basal, Fluctuando		Maduro, Fluctuando
	Basal, Aumentando		Maduro, Aumentando
	Basal, Estático		Maduro, Estático
	Degradado, Degradándose		Referencia, Degradándose
	Degradado, Fluctuando		Referencia, Fluctuando
	Degradado, Aumentando		Referencia, Aumentando
	Degradado, Estático		Referencia, Estático
	Productivo baja biomasa, Degradándose		Anomalia alto rendimiento, Degradándose
	Productivo baja biomasa, Fluctuando		Anomalia alto rendimiento, Fluctuando
	Productivo baja biomasa, Aumentando		Anomalia alto rendimiento, Aumentando
	Productivo baja biomasa, Estático		Anomalia alto rendimiento, Estática

MAPA DE LA CONDICIÓN DE LA TIERRA EN ESPAÑA 2000-2010
 JUNIO 2013

