CONSEJO ECONÓMICO
Y SOCIAL DE ARAGÓN

evaluación de las consecuencias ambientales de las sequías en el sector central del valle del ebro mediante imágenes de satélite: posibles estrategias de mitigación

sergio vicente serrano

evaluación de las consecuencias ambientales de las sequías en el sector central del valle del ebro mediante imágenes de satélite: posibles estrategias de mitigación

sergio vicente serrano

A la memoria de mi padre,
Martín Vicente Serrano

edita: CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ARAGÓN
Avda. César Augusto, 30. Ed. Verdi, 1º H
Teléfono: 976 21 05 50 - Fax: 976 21 58 44
50004 Zaragoza
Correo electrónico: cesa@aragon.es
Web: www.ces.aragon.es

d.l.: Z-219/06

diseño, preimpresión e impresión:
Navarro & Navarro, impresores
Arzobispo Apaolaza, 33-35
50009 Zaragoza

Actualmente, más del 90 por ciento de todos los desastres que ocurren en el mundo se relacionan con el agua –ya sea muy poca, como en el caso de las sequías, o demasiada, como sucede con las inundaciones, los deslizamientos de tierra, los ciclones, los huracanes y los tifones. Año tras año, muchas comunidades sufren al producirse estos desastres de forma reiterada. Está dentro de nuestras capacidades poder hacer algo al respecto... Podemos tomar decisiones más acertadas, mejorar la planificación, ser innovadores en materia de desarrollo y llevar a cabo actividades dirigidas a la protección ambiental – estas son las actividades humanas que pueden reducir la vulnerabilidad de las comunidades-. Con este propósito, tanto el manejo de los riesgos como la reducción de los desastres deben constituirse en partes integrales de los proyectos y políticas del desarrollo sostenible.

Mensaje del secretario general de las Naciones Unidas con motivo del día internacional
para la reducción de desastres. 8 de octubre de 2003.

A los catorce años le dije a mi padre: "¿Por qué no nos vamos a Balbastro, que es una población con ferrocarril y con obispo? Allí trabajaría usté menos y estoy seguro de que antes de seis meses se podrá comprar un traje nuevo"...Pero él decía siempre lo mismo: "Este año paice que la tierra está harta y el trigo apunta bien"...¿Y tu padre? ¿Hubo cosecha aquel año?, - Comenzó la primavera muy mal. Sacaron al Cristo y cayeron cuatro gotas; na, un bien quedar. Aquella tierra es un secarral inútil. Lo poco que salió se lo comieron los langostos... Una tarde encontraron a mi padre en la linde del campo. Me escribieron que de un mal al corazón; pero fue de hambre. No me lo decían, porque se tiene por vergüenza para un pueblo dejar que un vecino se muera así. Aquel año cogieron un cosechón borracho. ¡La farsa de la vida!.

Ramón José Sender, Imán (1930)

La elaboración de este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de un importante número de gente. En primer lugar debo agradecer al Departamento de Geografía de la Universidad de Zaragoza, y personalizando estos agradecimientos en su director, Miguel Sánchez Fabre, las facilidades brindadas para realizar este trabajo, tanto por la puesta a mi disposición de un lugar de trabajo, como de todos los medios de que dispone el Departamento. En segundo lugar, debo agradecer a aquellos organismos o particulares que han puesto a mi disposición su trabajo y que me han proporcionado las fuentes de información básicas a partir de las que se ha realizado esta tesis doctoral. Entre ellos citar al Instituto Nacional de Meteorología, y a su responsable de atención al público en el centro Territorial de Zaragoza, D. José Molina, por los datos climáticos que me suministraron para la realización del trabajo. Del Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid, no debo olvidar a José Luis Casanova y a Alfredo Romo, que aportaron las imágenes de satélite utilizadas. A Pascual Cano por ceder desinteresadamente la información sobre las producciones agrícolas de su explotación familiar. A Vicente Forteza, director de la Entidad Nacional de Seguros Agrarios por prestarme información sobre cosechas agrícolas. En este sentido no me gustaría olvidar al Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña y a Xavier Pons, director del Máster que imparte este centro, por aportarme buena parte de la formación necesaria para realizar este trabajo.

A mis compañeros y amigos del Instituto Pirenaico de Ecología: Nacho, David, Santiago y Javi, por su apoyo, y por acudir solícitos a mis demandas de ayuda en todo momento, a Teodoro, por sus inmejorables consejos a lo largo del tiempo que realicé este trabajo.

A mis compañeros del Departamento de Geografia, Manuel, Miguel Ángel y África, por su ayuda en diferentes fases de esta tesis. Pero, sobre todo, a José Carlos, con quien he podido discutir muchos aspectos de este trabajo. Sus consejos y sugerencias han sido valiosos en todo momento.

Finalmente, a José María, que durante la realización de este trabajo ha confiado en mi en todo momento, en ocasiones con una fe que no merezco.

Al Ministerio de Educación y Ciencia debo agradecer la concesión de una beca de Formación de Personal Investigador, sin la cual este trabajo no hubiera sido posible. La beca se enmarcó en el proyecto: "La sequía en Aragón: tendencias climáticas seculares y patrones de cambio ambiental" CLI99-098. Aunque también se ha contado con la ayuda de los proyectos de investigación: "Caracterización espacio-temporal de las sequías en el valle medio del Ebro e identificación de sus impactos" BSO2002-02743, Comisión Interministerial de Ciencia y tecnología. "Variabilidad climática y dinámica forestal en eco-

sistemas de ecotono" REN2003-07453, Comisión Interministerial de Ciencia y tecnología. "Clima y calidad ambiental en la ciudad de Zaragoza", Ayuntamiento de Zaragoza. 2000-2002 y del "Grupo de investigación consolidado: Clima, recursos naturales y cambio global". Gobierno de Aragón. 2003. BOA 147 de 18-12-02.

Este trabajo constituye un extracto de la tesis doctoral: Evolución espacio-temporal de las sequías en el sector central del valle del Ebro: causas y consecuencias ambientales, defendida en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza el 22 de abril de 2004 y que obtuvo la calificación de Sobresaliente cum laude por unanimidad.

índice

1. Introducción 11

2. Área de estudio 23

2.1. El sustrato litológico y edáfico 26

2.2. Las características climáticas 27

2.3. Usos del suelo y vegetación natural 33

3. Fuentes de información y metodología 39

3.1. La información climática 41

3.2. Identificación de la dinámica vegetal mediante imágenes de satélite 44

3.2.1. Las características espectrales de la vegetación 45

3.2.2. Las imágenes AVHRR procedentes de la serie de satélites NOAA 48

3.3. Fuentes de información para cuantificar las consecuencias de las sequías climáticas: utilización de datos agrícolas 62

3.4. Cálculo de los índices de sequía a partir de la información climática 63

3.5. Metodología para determinar el impacto de las sequías sobre la dinámica vegetal: integración de índices de vegetación, información geográfica y climática en un Sistema de Información Geográfica 67

3.6. Espacialización de la información climática mediante Sistemas de Información Geográfica 71

4. Patrones espaciales y dinámica de la vegetación a partir de las series de NDVI 79

4.1. Factores geográficos que condicionan la distribución espacial del NDVI 92

5. La variabilidad interanual de la cubierta vegetal 105

5.1. Análisis de la evolución temporal de la cubierta vegetal mediante series NDVI en el sector central del valle del Ebro (1987-2000) 115

6. Influencia del clima sobre la dinámica vegetal en el sector central del valle del Ebro 119

6.1. Metodología 124

6.2. Análisis mensual 133

6.3. Influencia de las variables climáticas sobre las diferencias interanuales del NDVI: análisis estacional y anual 138

7. Influencia de las sequías sobre la vegetación natural y los espacios agrarios en el sector central del valle del Ebro .161

7.1. Influencia de las sequías sobre el NDVI a escala anual 168

7.1.1. Diferencias en función de las diferentes cubiertas del suelo 176

7.1.2. Comportamiento diferencial de áreas concretas 181

7.2. Factores que condicionan las diferencias espaciales en la influencia de las sequías 193

7.3. Influencia de las sequías sobre la actividad vegetal a lo largo del año 198

7.4. Identificación y seguimiento de las sequías a partir de índices de vegetación. Comparación con los indicadores climáticos . .202

8. Valoración del impacto de las sequías sobre las producciones agrícolas 221

9. Desarrollo de un sistema de seguimiento y alerta temprana de las sequías mediante información espacio – temporal integrada en un sistema de información geográfica 255

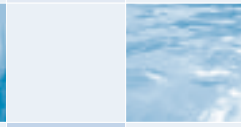
9.1. Validación del sistema de seguimiento mediante la comparación con las producciones agrícolas de secano . . .278

10. Discusión general 293

11. Conclusiones 309

12. Referencias bibliográficas 315

introducción



introducción

Aproximadamente el 85 % de los desastres naturales está íntimamente relacionado con fenómenos meteorológicos extremos (Obasi, 1994), y entre todos ellos las sequías son el fenómeno que más daños ambientales provoca. La WMO estima que desde 1967 las sequías han afectado al 50 % de las personas que han sufrido algún desastre natural.

Las sequías se incluyen dentro de los llamados riesgos hidrometeorológicos, de naturaleza atmosférica o hidrológica. Sin embargo, el intento de clasificar los riesgos naturales estableciendo una serie de categorías puede no resultar muy afortunado. En el caso de las sequías, aunque se trata de un fenómeno natural muy relacionado con el descenso o ausencia de precipitaciones, se encuentra interconexionado y afecta a la ocurrencia de otros riesgos de carácter biológico, como los incendios forestales, o riesgos de carácter geológico como la erosión del suelo. Las sequías constituyen de por sí una parte del medio ambiente, y ocurren en cualquier región del mundo, y a pesar de su carácter habitual afectan a la vida de una gran cantidad de gente, causando considerables daños a la economía y al medio.

La sequía es un evento natural complejo para el que no existe una definición universalmente aceptada (Wilhite, 1993), por lo que numerosos trabajos se han dedicado exclusivamente a clarificar los problemas existentes con relación a la definición del término. Wilhite y Glantz (1985) indicaron más de 150 definiciones del término sequía.

La sequía es compleja física y socialmente, y no existe una definición universal porque al contrario que las inundaciones, no resulta un fenómeno identificable en el tiempo y el espacio. Además, la sequía es, a menudo, el resultado de una gran complejidad de factores que actúan e interactúan con el medio, y para complicar más el problema de la definición, a menudo no se puede determinar el inicio o final de la sequía, que es reconocible únicamente tras un largo periodo sin precipitaciones (Changnon y Easterling, 1989).

A pesar de estos problemas, y en el contexto de los riesgos naturales, Burton et al. (1978) definieron la sequía como un riesgo penetrante, dada su frecuencia intermedia, su larga duración, su lenta velocidad de implantación, su carácter aleatorio en el tiempo, su gran extensión, y su elevada variabilidad espacial; se trata, por tanto, de un

evento extremo totalmente contrapuesto al riesgo intensivo que constituiría un terremoto o una inundación.

Dracup et al. (1980) señalaron que uno de los principales problemas para la definición de las sequías radica en el hecho de que se trata de un concepto utilizado por diferentes disciplinas académicas. Por ejemplo, los hidrólogos consideran las sequías como un periodo de tiempo en el que los caudales de los ríos se encuentran por debajo de su nivel normal, al igual que las reservas de los embalses. Los meteorólogos y climatólogos hablan de sequía cuando se produce un periodo de precipitaciones por debajo de las normales; los agrónomos consideran la sequía como un periodo de tiempo en el que las reservas de agua en el suelo no son suficientes como para poder producir cosechas, y los economistas hacen referencia a las sequías cuando los déficits hídricos afectan a la producción económica.

Pero a pesar de todos estos problemas de carácter conceptual, no resulta difícil dar una definición de la sequía, que podría ser considerada como un déficit hídrico que se produce cuando la demanda excede las reservas de agua disponibles (Havens, 1954; Pérez Cueva, 1983; Redmond, 2002), independientemente de la naturaleza que tenga ese déficit (precipitación, caudales, humedad del suelo, embalses, etc.). En esencia, el término es generalmente asociado a un largo y sostenido periodo de tiempo en el que las disponibilidades de agua, reservas hídricas o la humedad disponible en el suelo son escasas.

Los impactos de las sequías no suelen ser estructurales a menos que se repitan en el tiempo (en este caso habría que hablar de aridificación del clima y no exactamente de sequía). En contraste con los impactos de las inundaciones, huracanes y otros muchos eventos extremos, muy localizados y que pueden llegar a cambiar las características sociales, económicas, ambientales y paisajísticas de lugares concretos, el impacto de las sequías cubre amplias superficies, superiores a las afectadas por otros desastres naturales. Por esta razón, la cuantificación de los impactos de las sequías es más difícil de establecer.

En determinadas áreas del mundo las sequías son un fenómeno natural devastador, que afecta a más personas que otros fenómenos (Ofori-Sarpong, 1985; Kanti, 1998). En el mundo subdesarrollado las sequías dan lugar a graves consecuencias como el descenso de las producciones, del empleo, el incremento del precio de los productos agrícolas, el descenso en el consumo de alimentos y el hambre.

La vulnerabilidad en los países desarrollados es muy diferente a la de los países en desarrollo. En el mundo desarrollado una sequía podría definirse como un desastre natural no catastrófico (Weber y Nkemdirim, 1998). Sin embargo, aunque no se produzcan pérdidas de vidas humanas a causa de las sequías, se trata un fenómeno climático con funestas consecuencias económicas y que provoca una importante alarma social. La vulnerabilidad se incrementa debido al desarrollo económico, por lo que las pérdidas económicas que producen las sequías han aumentado considerablemente. Además, no sólo habría que contar con efectos económicos, sino que las sequías pueden tener importantes consecuencias sociales, en cuanto a la alarma social que generan y a la incertidumbre que producen en la planificación hídrica o agraria (p. ej., Krannich et al., 1995).

La gran atención que se ha prestado a las sequías en un país de gran desarrollo como EE.UU. (NDMC, 2003) es indicativo de las importantes pérdidas que produce el fenómeno. Por ejemplo, Svoboda et al. (2002) señalan que la sequía que afectó a Estados Unidos entre 1987 y 1989 causó más de 20.000 millones de dólares en pérdidas, como consecuencia de la reducción de las producciones agrícolas y forestales, a lo que hubo que sumar unos 10.000 millones más como consecuencia de los costes adicionales y del incremento de los precios de la alimentación.

Además, hay que tener en cuenta que apenas se consideran los posibles efectos ecológicos y ambientales de las sequías. La inclusión de esta temática resulta un aspecto reciente y que en primera instancia se encuentra relacionado con las actuaciones humanas y su papel como modificador del medio natural. En las regiones semiáridas no son desdeñables las consecuencias ecológicas de las sequías, ya que amplias extensiones han sufrido procesos de degradación causados por una mezcla de factores. En amplias áreas la cubierta vegetal ha sido eliminada o reducida de forma severa como consecuencia de las actividades humanas, y los suelos son erosionados de forma importante.

Las sequías no sólo entroncarían, pues, con graves perjuicios sobre la sociedad, sino que también pueden suponer un importante riesgo ambiental, sobre todo en las regiones áridas y de clima mediterráneo en las que la modificación paisajística, la degradación de la cubierta vegetal, los procesos de erosión y la entrada de especies menos adaptadas a las condiciones climáticas constituyen un proceso continuado durante siglos (Ibáñez et al., 1997). El problema de los efectos ambientales de los fenómenos naturales extremos se produce cuando el hombre altera los ecosistemas, reduce su biodiversidad,

y aumenta la vulnerabilidad de los mismos ante los fenómenos extremos. Las especies vegetales o animales que pueblan estos ecosistemas pueden no estar adaptadas a este tipo de eventos, y el suelo, debido a la degradación, puede tener menor capacidad para amortiguarlos. En estos espacios alterados las consecuencias de las sequías pueden ser muy importantes. En cambio, en los espacios donde predomina la vegetación natural, en los que no se han producido modificaciones por parte del hombre, es de esperar que las consecuencias de las sequías sean únicamente de carácter fisiológico, alterando los ritmos de crecimiento pero sin dañar a las plantas, ya que esa vegetación natural estará adaptada a las condiciones climáticas y a la sequía. Hay que tener en cuenta que los fenómenos extremos son consustanciales a la propia naturaleza, y han desempeñado un importante papel en el desarrollo biológico del planeta (Ayala-Carcedo y Cubillo-Nielsen, 2002), por lo que los sistemas naturales se encuentran adaptados a los fenómenos extremos como resultado de largos periodos de evolución y adaptación, siendo en algunos casos fenómenos necesarios para un adecuado funcionamiento de los ecosistemas.

En espacios transformados, en cambio, con los episodios de sequía más severos se pueden crear amplias áreas degradadas, paisajes desnudos o erosionados, daños a la vida terrestre y acuática, y estas sequías pueden contribuir a la ocurrencia de incendios forestales, con las consiguientes pérdidas posteriores (Pérez-Cabello, 2001). Además, las consecuencias de las sequías son muy negativas en los procesos de sucesión vegetal y recuperación tras las actuaciones humanas. Junto a ello, las sequías pueden producir una masiva mortalidad en especies vegetales no adaptadas al medio o introducidas por el hombre (López Bermúdez y Alonso, 2001; Pedersen, 1998; Olano y Palmer, 2003) y alterar las relaciones de competencia entre las especies.

La mayor parte de la Península Ibérica se ubica dentro de un área de características climáticas semiáridas, donde la variabilidad pluviométrica es elevada y las sequías constituyen un fenómeno frecuente. Ningún espacio de la Península Ibérica queda fuera de los episodios de sequía (Gil y Morales, 2001), pero son las áreas con precipitaciones inferiores a 600 mm las que experimentan de forma más manifiesta las consecuencias de la reducción de las precipitaciones. A pesar de los cambios económicos y sociales que han tenido lugar en España en las últimas décadas, las sequías generan importantes pérdidas en la agricultura de secano, con rendimientos inferiores a los normales o producciones nulas en los años secos (Austin et al., 1998; Molinero, 2001). Además, la conciencia sobre las posibles consecuencias ambientales de los fenómenos extremos se ha incrementado, tanto en el ámbito social, como con relación al interés de los diferentes inves-

tigadores. Aunque las consecuencias de las sequías sobre el medio natural están inducidas indirectamente por la acción humana, hay que contar con que las frecuentes y severas sequías que afectan a las áreas semiáridas de España suponen un importante riesgo de degradación, ya que limitan el desarrollo de las comunidades vegetales y hacen sensible el terreno a la energía producida por las frecuentes e intensas precipitaciones (López Bermúdez, 1994), además de suponer un riesgo para el incremento de los incendios forestales.

Dentro de las regiones semiáridas de la Península Ibérica, en el sector central del valle del Ebro las sequías son un riesgo frecuente y de negativas consecuencias. El centro del valle del Ebro constituye un área de marcado carácter semiárido, con un déficit general de precipitaciones y un balance hídrico negativo. En este espacio la agricultura de secano tiene un enorme peso socioeconómico y superficial, siendo la actividad que permite el mantenimiento de numerosos núcleos rurales dentro de la región.

Además, existen valiosos ecosistemas de carácter xérico que se encuentran en un estado de equilibrio inestable debido a las actividades humanas (Suárez-Cardona et al., 1992), y que pueden verse afectados de forma significativa por episodios de sequía (Braun-Blanquet y Bolós, 1954).

La vulnerabilidad de los espacios naturales ante los fenómenos de sequía apenas ha sido considerada en Aragón. Los ecosistemas muy alterados no son tan estables como los originales, adaptados durante milenios al clima de la región (Pedrocchi, 1998). Por ello, es necesario tratar de dar respuesta a la tesis sobre si ante un periodo prolongado de ausencia de precipitaciones se puede llegar a producir una degradación ambiental que de lugar a una ralentización en el proceso de sucesión vegetal y a procesos de degradación o desertificación (Balling, 1989).

Actualmente se discute sobre las posibles causas de los procesos de degradación y desertificación. Existen dos posibles explicaciones generales; por un lado se argumenta acerca del indudable papel humano en estos procesos de degradación (Mainguet, 1991), mientras que por otro lado, los recientes procesos de cambio climático, descenso de las precipitaciones y persistencia de las sequías en el Sahel, que han ido acompañados de un incremento de la desertificación, han supuesto que el número de investigadores que sostiene un desencadenante climático (fundamentalmente la persistencia de la sequía) de los procesos de degradación se incremente (Pickup, 1998).

Los procesos de degradación se localizan, fundamentalmente, en espacios de características áridas o semiáridas, en los que la acción humana ha sido determinante para transformar el primitivo paisaje natural. Las áreas esteparias del sector central del valle del Ebro, así como amplios espacios de secanos extensivos, localizados sobre suelos pobres y salinos, cumplen los requisitos para ser consideradas áreas con posibles problemas de degradación. La degradación reduce la productividad y el potencial biológico, y se manifiesta mediante complejos procesos de deterioro de la vegetación y el suelo, que resultan, en términos antrópicos, en un descenso de la capacidad del espacio para soportar poblaciones animales o humanas.

Por ello, es muy importante determinar el papel que han tenido las sequías, no sólo sobre los cultivos, sino sobre la dinámica vegetal en aquellas áreas más sensibles a los procesos de degradación. En un escenario climático en el que se espera un recrudecimiento de las sequías en el ámbito mediterráneo a lo largo del siglo XXI (Jones *et al.,* 1996; Houghton *et al.,* 2001), es necesario determinar el papel que tienen las sequías en la dinámica de la vegetación natural, pues ello puede servir para aproximar las posibles consecuencias de dichos cambios y plantear una más adecuada gestión ambiental.

La identificación de los impactos de las sequías se encuentra con un importante problema relacionado con las fuentes de información disponibles. Frecuentemente, los métodos planteados se basan en la identificación del descenso del rendimiento en los cultivos como consecuencia de la falta de agua (Schütz y Fagmeier, 2001; Quiring y Papakryiakou, 2003; Alexandrov y Hoogenboom, 2000) o la pérdida de agua en las plantas (Hanson y Weltzin, 2000; Vilagrosa, 2002; Pastor *et al.,* 1995), técnicas que se llevan a cabo mediante muestreos de campo o parcelas experimentales. Sin embargo, este planteamiento presenta indudables limitaciones, ya que a pesar de que se dispone de una información muy precisa, ésta es fragmentaria en el espacio y en el tiempo.

Para solventar este problema es cada vez más común la utilización de la teledetección en el seguimiento espacial y temporalmente continuo de la vegetación, y para identificar unas anomalías, tanto espaciales como temporales, que pueden asociarse a la ocurrencia de sequías. Con las imágenes de satélite se dispone de información en la totalidad del territorio, cuya densidad de muestreo dependerá de la resolución del sensor.

Las imágenes de satélite se han mostrado como una herramienta útil en el análisis de la dinámica vegetal a escalas de análisis local (Ringrose y Matheson, 1991; Vázquez *et al.,* 2000), regional (Nicholson *et al.,* 1990; Wang *et al.,* 2001 y 2003) o global (Lucht

et al. 2002; Kawabata *et al.,* 2001; Kogan, 2001). Por ejemplo, Justice *et al*. (1985) analizaron la fenología de la vegetación a escala global utilizando imágenes NOAA-AVHRR, y comprobaron las enormes posibilidades que presenta esta información para la identificación de la estacionalidad vegetal, sus fases de crecimiento, y en la diferenciación de forma precisa entre tipos de cubiertas. Tal como indican Groten y Ocatre (2002), esta información permite determinar la duración del periodo vegetativo de las plantas de forma más precisa que la información agrometeorológica, y en las áreas agrícolas es posible el seguimiento del desarrollo de los cultivos a lo largo de los ciclos fenológicos. La teledetección, además, cuenta con la ventaja de permitir una cobertura temporal continua en amplias áreas y, en el momento actual, en el que algunos satélites llevan recogiendo información durante más de 20 años, disponer de series históricas sobre la evolución vegetal.

A partir de la información de reflectividad en diferentes regiones espectrales, y debido a las propiedades físicas de la vegetación y su respuesta ante la radiación solar, se pueden desarrollar índices de vegetación, que detallan con gran exactitud la actividad vegetal, su cobertura espacial, así como la producción total de biomasa. El más utilizado de ellos es el índice de vegetación normalizado (NDVI, Tucker, 1979). Numerosos autores han utilizado el NDVI para determinar el impacto de las condiciones climáticas y de las sequías sobre la vegetación natural o sobre los cultivos a diferentes escalas espaciales. Por ejemplo, Hutchinson (1991) discutió la capacidad del NDVI para determinar áreas de riesgo de hambrunas en el Sahel, y analizó la utilidad de esta información como sistema de alerta temprana de las sequías. Con este mismo objetivo Hellden y Eklundh (1988) analizaron el impacto de las sequías en Etiopía, a partir del NDVI, entre los años 1982 y 1985.

Las series temporales de NDVI están muy determinadas por las variables climáticas, incluyendo las precipitaciones y la evapotranspiración en un amplio rango de condiciones ambientales (Justice *et al.,* 1986; Cihlar *et al.,* 1991). De hecho, las variaciones de NDVI pueden considerarse representativas de las respuestas a la variabilidad climática a varias escalas espacio-temporales (Eastman y Fulk, 1993; Andres *et al.,* 1994; Myneni *et al.,* 1995; Anyamba y Eastman, 1996).

Numerosos trabajos han analizado la influencia de los elementos del clima sobre la actividad vegetal, fundamentalmente el papel de las temperaturas, precipitaciones, evapotranspiración, así como las condiciones hídricas del suelo. Ichii *et al.* (2002) relacionaron los valores de NDVI con los de temperaturas y precipitaciones a escala global, observando una relación positiva y significativa entre el NDVI y las temperaturas en las

latitudes medias y elevadas de Europa y Asia, mientras que la mayor correlación entre el NDVI y las precipitaciones fue registrada en regiones desérticas y subdesérticas, como el Sahara, Sudáfrica, Australia, así como en amplias áreas de Asia central.

Pocos estudios han considerado la influencia de las sequías sobre la vegetación mediante la utilización de índices de sequía (ver por ejemplo: Gutman, 1990; Walsh, 1987; Lotsch *et al.,* 2003). Más frecuentemente se han utilizado ecuaciones de balance hídrico del suelo o precipitaciones acumuladas en el tiempo, que consideran las condiciones de humedad a escalas temporales amplias (Kerr *et al.,* 1989). En este sentido, Nicholson *et al.* (1990) analizaron la correlación existente entre el NDVI mensual, las precipitaciones del mes en curso y las acumuladas de los 2 y 3 meses anteriores, mostrando que la vegetación no responde directamente a las precipitaciones, sino a la humedad del suelo, que ellos consideran una integral de las precipitaciones en varios meses. Con relación a los impactos de las sequías, Teiszen *et al.* (1997) documentaron, en las grandes llanuras americanas, una sustancial reducción de los valores de NDVI anuales los años en los que se registran condiciones secas, señalando importantes efectos asociados a las condiciones de humedad registradas al inicio de los ciclos vegetativos de las plantas.

En este trabajo se analizan los impactos de las sequías sobre la vegetación natural y los cultivos en el sector central del valle del Ebro a partir de índices de vegetación procedentes de imágenes NOAA-AVHRR. La influencia de las sequías sobre la dinámica vegetal se ha analizado relacionando índices de sequía climáticos con índices de vegetación. El análisis se ha realizado desde una perspectiva temporal interanual, considerando el área de estudio en su conjunto y, además, análisis más detallados para diferentes cubiertas y uso del suelo. Con estos análisis se pretende mostrar las áreas más vulnerables ante las sequías.

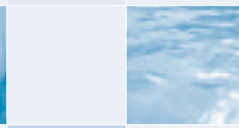
En el valle del Ebro, a pesar de que el interés sobre los recursos hídricos se centra cada vez más en el carácter hidrológico de los mismos, hay que tener en cuenta que los efectos de la escasez de lluvias sobre la vegetación natural y los cultivos, considerando las sequías desde un punto de vista climático, agrícola y ambiental sigue teniendo también un gran interés. Ésta es la considerada sequía por excelencia, la que pudiéramos denominar clásica o tradicional, que es la que todavía tiene un importante impacto social.

Dado el interés que presenta el fenómeno de las sequías en este espacio resulta necesario abordar un trabajo que considere los impactos de las sequías desde un plan-

teamiento ambiental y que enlace con el adecuado desarrollo de planes de prevención y gestión que se asienten, de forma rigurosa, en un conocimiento real del fenómeno.

El cambio climático, la pérdida de diversidad biológica y la desertificación son los tres principales problemas ambientales de nuestro tiempo (López Bermúdez, 1985 y 2000) y en todos ellos la sequía aparece, bien como consecuencia o como causa de dichos procesos. Por esta razón, y en un área considerada de transición climática y ecotono ecológico, es necesario abordar un estudio detallado sobre las consecuencias de las sequías, para su mejor comprensión, y para que pueda servir como posible herramienta de gestión y planificación territorial.

área de estudio



2. Área de estudio

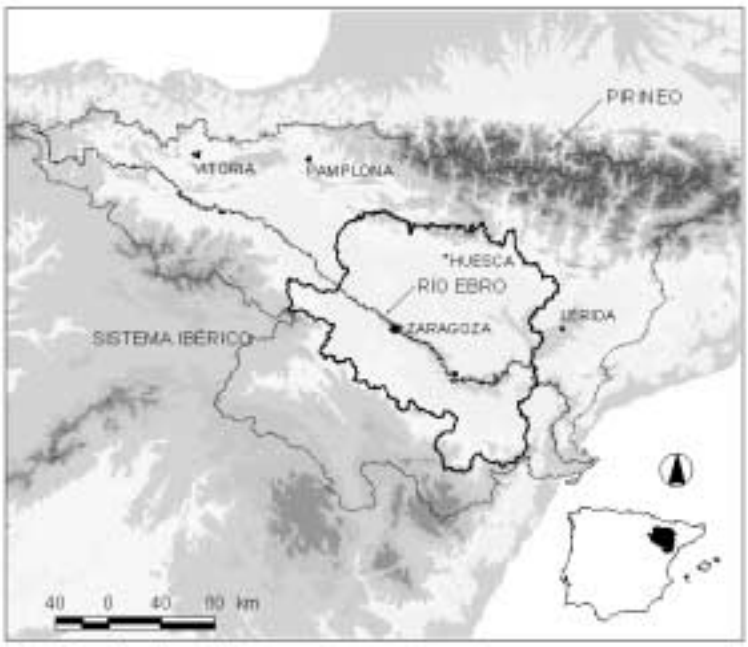
El sector central del valle del Ebro es una de las regiones más áridas de la Península Ibérica, donde la variabilidad climática y especialmente pluviométrica introduce una limitación importante para el desarrollo de determinantes actividades y ecosistemas naturales. Además, en este espacio predomina la ocupación de unos usos del suelo (cultivos de secano en el caso de los antrópicos y estepas o bosques en el de los naturales) cuyo crecimiento, desarrollo o avance natural están muy determinados por la disponibilidad de agua; por ello, la escasez de recursos hídricos y las frecuentes sequías van a ser unos limitantes de primer orden.

En el caso de los usos agrarios, el clima y la aridez dominante han configurado paisajística y productivamente la región, con el predominio de un hábitat concentrado en el que son necesarias grandes explotaciones para obtener una cierta rentabilidad del trabajo (Frutos, 1982). Se trata de un área escasamente productiva como consecuencia de la mencionada aridez, por la pobreza del sustrato y por la frecuencia con la que se producen las sequías (Austin *et al.,* 1998). En el caso de la cubierta natural, el paisaje ha sido muy transformado desde tiempos históricos, siendo sustituidos los antiguos bosques (sabinares) y matorrales (coscojares) por grandes extensiones dominadas por especies herbáceas o arbustivas (Pedrocchi, 1998). Hoy en día los espacios con vegetación natural son escasos, predominando los cultivos cerealistas en las áreas de secanos y el desarrollo de regadíos.

En la figura 1 se muestra la localización del área de estudio, que integra el sector central del valle del Ebro y sus somontanos. El área de estudio se localiza entre 40.66 y 42.46 grados de latitud norte y entre 1.86 de longitud oeste y 0.6 de longitud este. El área de estudio representa límites muy precisos, pudiendo considerarse como un espacio homogéneo desde el punto de vista geográfico. Al norte el límite es establecido por las Sierras Exteriores pirenaicas que constituyen las primeras estribaciones de la cordillera Pirenaica. Al sur el límite lo constituye la Cordillera Ibérica. Los límites este y oeste son administrativos. El límite oriental lo conforma el límite con Cataluña y el occidental con Navarra y La Rioja. De esta forma, el núcleo del área de estudio es la cubeta aragonesa del valle del Ebro con unos límites topográficos muy precisos al norte y sur.

figura 1

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL CONTEXTO DEL VALLE DEL EBRO



La elevación oscila entre 58 metros en el sector oriental del curso del río Ebro y los 2235 metros en el pico del Tozal de Guara en las sierras exteriores pirenaicas. A pesar de estos contrastes altitudinales, la mayor parte de la superficie corresponde a alturas comprendidas en un rango entre 200 y 400 metros (10223 km^2, correspondientes al 44.5 % de la superficie total), o entre 400 y 800 metros (41.9 %). Por debajo o encima de estos rangos altitudinales se ubica menos del 15 % del área de estudio, y las elevaciones superiores a 1000 metros aparecen de forma testimonial (únicamente 567 km^2). Así pues, dominan las elevaciones bajas y la relativa planitud, matizada por la configuración geomorfológica de la cuenca y por la presencia de valles fluviales y algunas sierras significativas. La pendiente del terreno resulta suave (excepto en las áreas más septentrionales y en el macizo del Moncayo, en la cordillera Ibérica).

2.1. El sustrato litológico y edáfico

Tanto las características climáticas como la vegetación y los usos del suelo que conforman el paisaje están condicionados por la configuración del relieve. El hecho de que el valle forme una auténtica cubeta topográfica, rodeada por cadenas montañosas, confiere al sector central del valle unas condiciones climáticas muy continentales y extremadas, así como la presencia de un tipo de vegetación adaptado a estas condiciones. Los campos de cultivo se ubican en las zonas más adecuadas para estas prácticas (sobre aluviales, terrazas fluviales y glacis), mientras que la vegetación natural es desplazada a zonas de mayor pendiente, donde los cultivos no resultan adecuados, como las laderas de muelas o cerros. El relieve también determina el tipo de suelo, su profundidad y la capacidad de retención de humedad, aspectos que condicionan, en todos los casos, la influencia de las sequías.

La composición litológica se caracteriza por el predominio de materiales terciarios, y solamente en determinados sectores del área de estudio, como las estribaciones prepirenaicas, áreas de la Cordillera Ibérica y de los puertos de Beceite el sustrato litológico es preterciario. El relleno sedimentario de la cuenca muestra las características de una cuenca lacustre, con cambios laterales de facies desde los bordes hacia el centro. Los depósitos se caracterizan por la aparición de conglomerados y areniscas en los márgenes de la depresión, areniscas y arcillas en las zonas intermedias, y en las zonas centrales del valle por la presencia de formaciones evaporíticas (yesos, sales, margas y calizas) formadas en el Mioceno. El techo de la sedimentación lo constituyeron potentes capas de calizas que constituyen la cumbre actual de los relieves estructurales de la depresión (Peña *et al.,* 2002).

Debido al sustrato dominante (calcáreo y yesífero) y a las duras condiciones climáticas, la aridez y las actividades humanas durante siglos, los suelos del sector central del valle del Ebro se caracterizan por una escasa cantidad de materia orgánica. En este espacio la formación de humus se ve dificultada o impedida por las duras condiciones climáticas y, en general, dominan los suelos brutos y poco evolucionados (Higueras, 1981). Los suelos suelen ser muy alcalinos (Ph > 8) con baja materia orgánica (< 20 g kg-1) y un elevado grado de carbonatos (> 300 g kg-1), dominando las texturas arcillosas y arenosas (Montañés *et al.,* 1991). Además, estos suelos suelen ser muy susceptibles a la degradación, particularmente los ubicados sobre materiales evaporíticos (Navas, 1990).

En el centro de la depresión las litologías yesíferas tienen un importante peso superficial. Los suelos yesíferos presentan bajos contenidos de nutrientes como consecuencia de la escasa capacidad de intercambio iónico. A ello se une la elevada movilidad del yeso a lo largo de todo el perfil del suelo y su elevada presión de cristalización, que actúa como factor fundamental en la generación de porosidad edáfica, lo que da lugar a elevadas capacidades de infiltración y aireación que favorecen la evapotranspiración (Desir, 2001); todo ello supone que los suelos del centro del valle estén muy poco desarrollados, tengan escasa capacidad de retención de agua y sean muy alcalinos (Frutos, 1994).

2.2. Las características climáticas

El clima de la región puede englobarse dentro de los climas mediterráneos, con un importante grado de continentalidad. Sus características climáticas están determinadas por una serie de factores geográficos y atmosféricos. Respecto a los primeros, hay que señalar que el sector central del valle del Ebro constituye, topográficamente, una cubeta encerrada por una serie de cadenas montañosas, aspecto que produce un importante efecto de "sombra pluviométrica", de tal forma que las precipitaciones son superiores en las cadenas marginales, mientras que en el interior del valle la precipitación es escasa. Además, el carácter interior del área de estudio también produce una importante reducción de la humedad del aire, que pierde su capacidad de regulador térmico, lo que supone que el clima tenga unos claros rasgos de continentalidad. En las tierras centrales del Ebro las masas de aire que llegan, dominantemente de componente W, sufren un progresivo desecamiento al cruzar el valle (Creus y Ferraz, 1995), aspecto que determina la acusada aridez que caracteriza el clima conforme la influencia mediterránea se incrementa hacia el este (Ruiz, 1982; Creus, 1983).

Respecto al segundo de los factores, ligado a la circulación atmosférica de la zona templada, hay que señalar que el interior de la depresión del Ebro se sitúa en el área límite entre los cinturones templado y subtropical. Esta situación determina la marcada estacionalidad climática que caracteriza la región, debido al movimiento intranual de este límite, que alcanza las latitudes de esta región en invierno, mientras que en verano se desplaza latitudinalmente hacia el norte. En determinados meses del año predominan condiciones climáticas propias de la zona templada, como consecuencia de la presencia de masas de aire polar y la influencia repetida de perturbaciones atlánticas; mientras que conforme avanza el verano se produce un descenso de la frecuencia de estos fenómenos, como consecuencia del dominio de las masas de aire subtropicales que provocan

situaciones de mayor estabilidad. Los periodos de transición (primavera y otoño) están afectados por ambos tipos de influencia, aspecto que produce un clima muy cambiante y complejo.

Así pues, el clima presenta una gran variabilidad estacional (Cuadrat, 1999), pero además, la variabilidad interanual también puede resultar muy significativa, con circulaciones atmosféricas muy contrastadas entre años.

La marcada estacionalidad en la influencia de las masas de aire se manifiesta en el reparto de los elementos del clima. En la figura 2 se muestra un ejemplo de diagramas termopluviométricos en diferentes observatorios del área de estudio. En general, el comportamiento estacional de las temperaturas es muy homogéneo entre los diferentes observatorios, con mínimos invernales, máximos estivales y con una elevada amplitud térmica entre los valores medios de invierno y verano, que puede llegar hasta 18ºC en las áreas centrales del valle, indicativa de la importante continentalidad que caracteriza el área de estudio. Los inviernos son fríos y de larga duración, siendo frecuentes las heladas, aspecto que limita, de forma importante, el desarrollo de la vegetación y de los cultivos en el interior del valle. En el centro del valle se registran cuatro meses en los que las temperaturas medias se sitúan por debajo de 10º, con temperaturas extremas en estas zonas inferiores a –10ºC. En invierno, el aire frío y seco suele acumularse en la cubeta central, y puede permanecer varios días, causando frecuentes inversiones térmicas y muy bajas temperaturas (Creus y Ferraz, 1995).

Además, aunque de enero a abril la temperatura se incrementa de forma paulatina, en este mes suelen producirse bruscos descensos, debido a la entrada de masas de aire polar, que pueden causar heladas nocturnas e importantes pérdidas en los cultivos (Hernández, 1992).

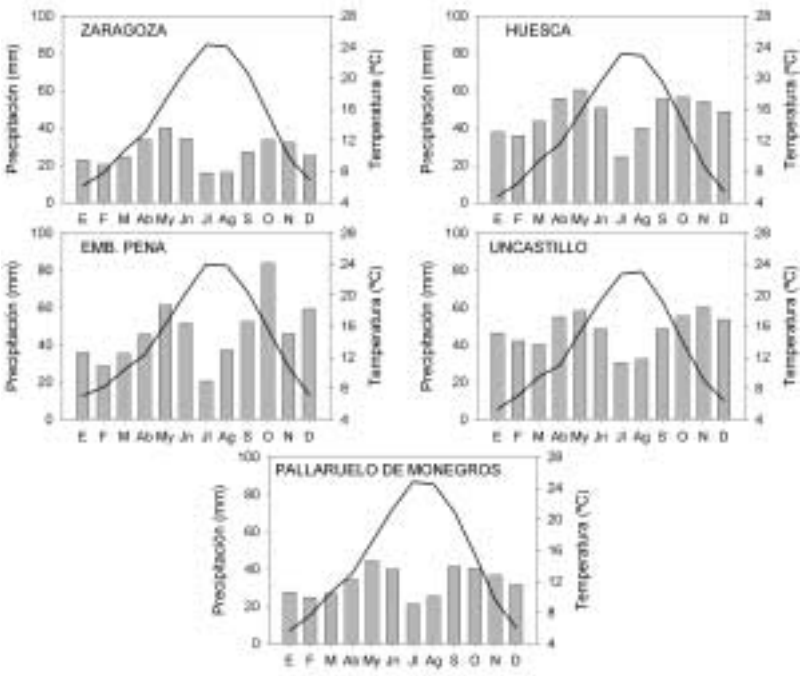
Frente a las características generales del invierno, en verano se registran condiciones de calor muy severo durante prolongados periodos de tiempo; aunque en el centro del valle se registren valores medios en los meses estivales en torno a 24 ºC, las máximas pueden alcanzar 40 ºC, con el consiguiente efecto evaporante.

En el caso de las precipitaciones, las diferencias estacionales son mayores en el espacio. Los termopluviogramas de la figura 2 muestran, además de importantes diferencias en los volúmenes totales, contrastes estacionales significativos. En las zonas centrales del valle (de las que son representativas las figuras de Zaragoza y Pallaruelo de

Monegros) las precipitaciones son escasas durante todos los meses del año, y apenas se aprecia una estacionalidad en los valores de precipitación, con escasas diferencias estacionales, aunque es el verano la estación que menos precipitación registra. En los observatorios representativos de las áreas más septentrionales (Uncastillo, ubicado en las altas Cinco Villas, y Huesca) el volumen total de precipitaciones se incrementa significativamente respecto al centro del valle, siendo el reparto estacional mucho más claro, así como las importantes diferencias entre los meses estivales (con valores pluviométricos similares a los del centro de la depresión) y las precipitaciones otoñales y primaverales, que en los meses de mayo y noviembre superan, en promedio, los 60 mm. La estacionalidad es indicativa de la desigual influencia de masas de aire entre el verano (influencia subtropical) y el resto de estaciones. Un comentario particular merecen las tierras del

figura 2

EJEMPLO DE DIAGRAMAS TERMOPLUVIOMÉTRICOS DE DIFERENTES OBSERVATORIOS EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO. 1. PRECIPITACIÓN 2. TEMPERATURA MEDIA 3. EVAPOTRANSPIRACIÓN 4. BALANCE HÍDRICO.



sudeste. El observatorio del embalse de Pena, ubicado en la cuenca del río Matarraña, ya cerca de la provincia de Tarragona, muestra una clara estacionalidad, con máximos otoñales como consecuencia de la influencia de las perturbaciones mediterráneas dominantes durante esta estación, mientras que en primavera e invierno (momento en el que domina la influencia de las borrascas atlánticas) se registran más bajos valores de precipitación, como consecuencia de su posición oriental.

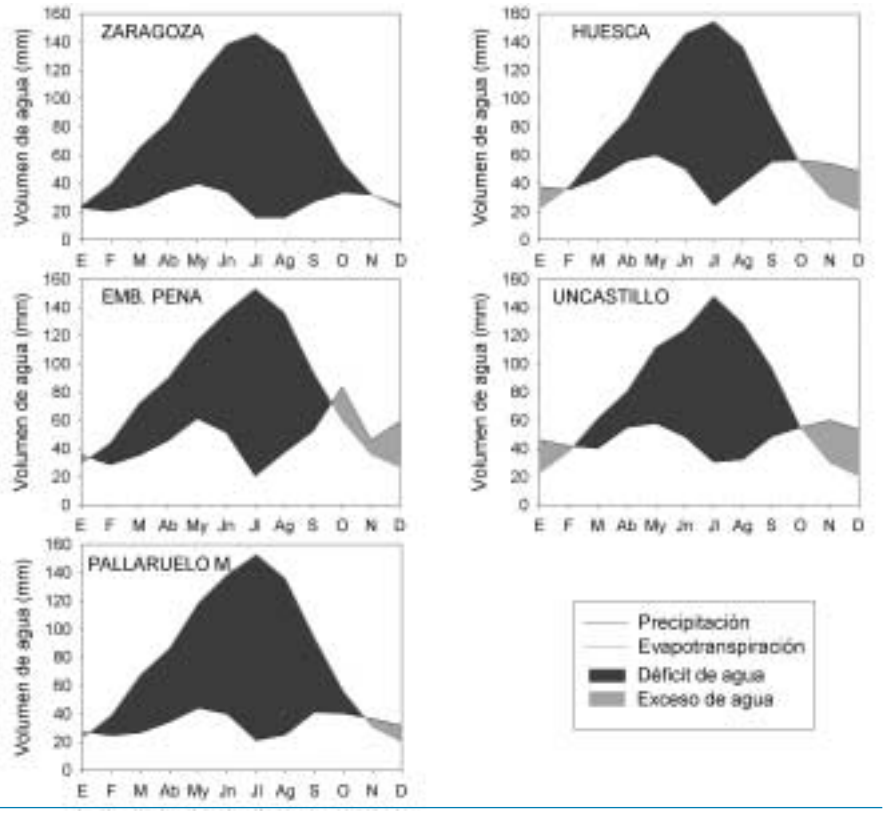
Este reparto térmico y pluviométrico (con elevadas temperaturas durante varios meses y escasas precipitaciones en el centro del valle) supone que el clima sea muy seco, y que el paisaje de algunos sectores se pueda considerar casi desértico. Las pérdidas de humedad como consecuencia de los procesos de evapotranspiración son importantes, lo que supone que estas tierras sean deficitarias en agua (Liso y Ascaso, 1969).

En la figura 3 se muestra una gráfica en la que se indican las diferencias mensuales medias entre evapotranspiración potencial (calculada según Hargreaves, 1985) y los valores pluviométricos, así como los meses en los que, por término medio, se producen excesos o déficits hídricos. En la totalidad de observatorios representativos del área de estudio se registra un predominio de déficits hídricos (precipitación – evapotranspiración) durante la mayor parte del año. Muy llamativo es el caso de los observatorios del centro de la depresión (Zaragoza y Pallaruelo de Monegros), donde excepto los meses de diciembre y enero, en el resto de meses se registran déficits hídricos. En general, únicamente se registran valores positivos en los meses otoñales e invernales, pero estos valores son muy inferiores a la magnitud que presentan los balances negativos.

En la figura 4 se muestra la distribución espacial de precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración potencial (ETP, calculada según Hargreaves, 1985) y el balance anual entre precipitaciones y ETP. Los mapas han sido obtenidos por diferentes métodos de interpolación. Lo más llamativo de estas cartografías son las significativas diferencias espaciales. En el caso de las precipitaciones, éstas representan más del doble en los sectores septentrionales (> 650 mm) que en el centro del valle, donde se registran menos de 350 mm. En el sudeste se registra también un incremento de las precipitaciones relacionado con un aumento de la elevación, así como de la influencia de perturbaciones mediterráneas (tal como se ha referido en el caso del observatorio del embalse de Pena, ubicado en este sector). En el extremo occidental también se registra otro máximo relacionado con la presencia del macizo del Moncayo.

figura 3

BALANCE DE AGUA (EVAPOTRANSPIRACIÓN - PRECIPITACIÓN)



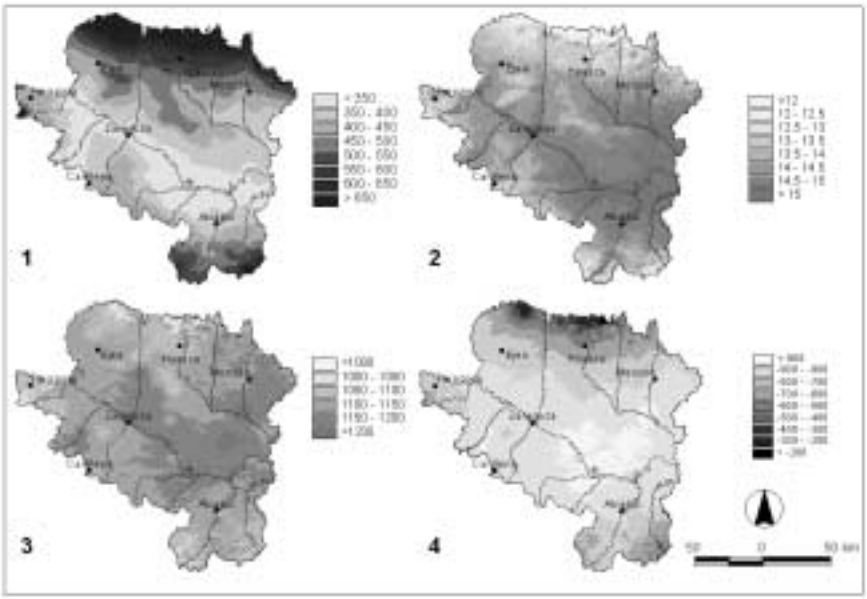
Respecto a las temperaturas y la evapotranspiración potencial, en las áreas más orientales de la cubeta del Ebro es donde se registran las temperaturas medias anuales más elevadas y, como consecuencia, las mayores tasas de ETP, superiores a los 1200 mm anuales.

A pesar de estos importantes contrastes espaciales en los valores de precipitación y ETP, la práctica totalidad del área de estudio muestra balances negativos (exceptuando algunos sectores montañosos), muy acusados (más de 900 mm de déficit) en las zonas centrales del valle, especialmente en el sector más oriental.

Estas características hacen que el clima de amplios espacios del sector central del valle se considere como semiárido. La UNESCO (1979) propuso una clasificación de las regiones semiáridas de acuerdo al valor de la ratio entre precipitación y ETP anual, de tal forma que el grado de aridez se puede determinar por una simple relación entre la precipitación y la pérdida de agua. La agricultura de secano, de acuerdo a esta clasificación, sólo es posible en las zonas semiáridas, siendo las fluctuaciones de producción interanual muy importantes como consecuencia de la variabilidad pluviométrica (De Pauw *et al.,* 2000). Según la clasificación climática de la UNESCO (1979), todo el centro de la depresión presenta estas características, mientras que solamente los espacios más septentrionales o sudorientales muestran características sub-húmedas.

figura 4

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS ANUALES PROMEDIO EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO. 1. PRECIPITACIÓN 2. TEMPERATURA MEDIA 3. EVAPOTRANSMISIÓN 4. BALANCE HÍDRICO



Así pues, la importante aridez, al igual que los contrastes estacionales e interanuales, suponen un gran limitante para el desarrollo de la actividad vegetal y la implantación de cultivos. Las condiciones limitantes que impone un invierno largo con frecuentes heladas, las escasas e irregulares precipitaciones y las elevadas pérdidas de agua por

efecto de la evapotranspiración hacen que la vegetación tenga problemas para su implantación y desarrollo, siendo las especies naturales muy fuertes y resistentes a esta dureza climática. La conformación del paisaje vegetal estará determinada por estas condiciones climáticas, así como por las características geomorfológicas y litológicas.

2.3. usos del suelo y vegetación natural

A pesar de la planitud dominante, y de los escasos accidentes topográficos que existen en el área de estudio, hay que señalar que el sector central del valle del Ebro se caracteriza por una importante diversidad paisajística. La existencia de corredores fluviales, los relieves residuales, las diferencias de suelo o la actividad humana, han configurado un paisaje actual que se puede calificar de muchas formas, pero en modo ninguno de homogéneo o monótono.

A lo largo de la historia, el paisaje del sector central del valle del Ebro ha cambiado considerablemente como consecuencia de la acción humana. Entre las fases más significativas hay que destacar el importante proceso deforestador en el valle del Ebro entre los siglos XIV y XV. Este proceso estaría causado, fundamentalmente, por la ganadería, debido a los elevados censos de ganado trashumante que albergaba el valle en invierno (Rinschede, 1972). Durante estos siglos la orientación del valle era eminentemente ganadera; en este sentido es significativo el que la Casa de Ganaderos de Zaragoza controlara una cabaña de hasta 120000 cabezas de ganado ovino en el siglo XVIII (Frutos, 1976).

En el siglo XVIII las talas indiscriminadas y el pastoreo hicieron desaparecer de forma general los bosques en esta zona (Frutos, 1976). Hasta este momento los tradicionales cultivos de cereal se complementaban con el viñedo, olivo, almendro, azafrán y barrilla, de cuya ceniza se extraía la sosa (Martí, 1992), pero eran dominantes los pastizales para el mantenimiento del ganado. Con los procesos desamortizadores se expropiaron las tierras comunales y se extendieron las roturaciones (Pinilla, 1995), duplicándose o triplicándose las tierras de labor en los municipios, aunque el peso ganadero en los montes resultaba muy fuerte y se mantuvieron sin cultivar amplias extensiones (Frutos, 1976).

En el sector central del valle del Ebro han sido dominantes los monocultivos de vid, olivo y cereal (Marín Cantalapiedra, 1973), lo que ha supuesto tradicionalmente un riesgo para la vida económica de un gran número de municipios. A partir de 1939, con

la creación del Servicio Nacional del Trigo, el uso del secano se polariza hacia el cereal. La vid, el olivo y el almendro se redujeron a pequeñas parcelas dedicadas al consumo familiar. Con la intensificación de la agricultura y la mecanización del campo, en la década de 1960 se produce una profunda transformación, con un aumento de abonos, pesticidas y un descenso de la diversidad paisajística, ya que el cultivo de la tierra se intensifica. Se llegó a cultivar cualquier tierra, e incluso los matorrales fueron explotados con gran intensidad, ya que el esparto era utilizado para la producción de papel, aspecto que agudizó, de forma importante, los procesos de erosión y degradación en amplias áreas del valle.

Además de estos procesos de transformación, hay que incluir también el importante desarrollo del regadío en el sector central del valle del Ebro. Mientras que hasta la década de 1920 solamente estaban cultivadas mediante este sistema las vegas tradicionales de los principales ríos, a lo largo de la segunda mitad del siglo XX se extendieron de forma muy importante los campos cultivados por regadíos, sobre todo en la margen izquierda del río Ebro, con la puesta en cultivo de los polígonos de Bardenas (en contacto con Navarra) y amplias áreas del sector oriental gracias a la construcción de los canales de Monegros y de Aragón y Cataluña. En los últimos 25 años el ritmo de creación de regadíos se ha reducido considerablemente, aunque en la década de 1990 se ha iniciado el desarrollo del proyecto Monegros II, con la puesta en regadío de más de 25.000 has.

Actualmente, el paisaje es eminentemente agrario, pero se asiste a unos nuevos procesos de transformación. La entrada en la Unión Europea introdujo aspectos de carácter ambiental en la gestión de los recursos, tratando de compaginar una agricultura más extensiva y una mejor conservación del medio. La retirada de tierras de cultivo ha sido un aspecto significativo, que en amplias áreas del sector central del valle ha afectado a más del 5 % del total (Errea y Lasanta, 1993). Actualmente, y debido a su escasa rentabilidad, los cultivos cerealistas de secano están atravesando una crisis que amenaza su futuro, con una nueva amenaza de abandono si se produce la retirada de subvenciones, aspecto que puede producir importantes problemas económicos, ecológicos y sociales. El abandono puede causar problemas de erosión debido a las dificultades para la colonización por parte de la vegetación y a la pobre estructura del suelo (Lasanta *et al.,* 1995).

Las áreas de cultivos de secano se localizan en las zonas centrales del valle, aprovechando los espacios de relieve más llano. Sin embargo, no se produce una homogeneidad de este tipo de uso, ya que los relieves estructurales residuales que se ubican en

el centro de la depresión muestran una cubierta de bosques (coníferas principalmente) y matorrales. Además, los corredores que suponen los ríos principales (Ebro, Gállego y Jalón) también introducen cierta diversidad, al albergar cultivos de regadío tradicionales. Igualmente, la creación de regadíos fuera de las llanuras de inundación de los ríos, a lo largo del siglo XX (Frutos, 1982), también introduce un rasgo más de diversidad paisajística dentro de la región. Si exceptuamos los bosques localizados en los relieves estructurales del centro de la depresión, el resto de masas boscosas se localizan, preferentemente, en el sector septentrional, en un área montañosa de mayor elevación y condiciones climáticas más húmedas, y en el sector sudoriental, también montañoso. En el somontano del Moncayo también aparecen amplias extensiones de bosques, tanto pinares de repoblación como robledales y hayedos, ubicados propiamente en el macizo del Moncayo. La teselación y fragmentación son muy significativas, y exceptuando las áreas de cultivos de regadío, en las que la homogeneidad resulta superior, el resto de usos configuran un mosaico paisajístico muy significativo a la escala considerada.

En la tabla 1 se muestra el peso superficial de cada uno de los usos del suelo. En total predominan los usos antrópicos del espacio, con un 60.1 % de la superficie total, considerando las diferentes categorías de cultivos y las zonas urbanas. Los cultivos de secano (a los que se añaden las áreas agrícolas con un mosaico de vegetación natural) representan un importante porcentaje (38,9 %), muy superior al de los cultivos de regadío (20.8 %). Sin embargo, el uso del suelo con mayor superficie corresponde a las áreas de matorrales y pastizales (25.7 %), que a lo largo del siglo XX se han mantenido en

tabla 1

SUPERFICIE OCUPADA POR LOS DIFERENTES USOS DEL SUELO. DATOS EN HAS Y EN PORCENTAJES

Usos del suelo	Superficie (ha)	Superficie (%)
1- Zonas urbanas	9760	0.4
2- Cultivos de secano (herbáceos)	490138	21.4
3- Cultivos de secano (permanentes)	14763	0.6
4- Cultivos de secano (mosaico de herbáceos y permanentes)	75838	3.3
5- Cultivos de regadío	476646	20.8
6- Bosques de frondosas	37204	1.6
7- Bosques de coníferas	180650	7.9
8- Bosques mixtos	83048	3.6
9- Matorrales y pastizales	589200	25.7
10- Áreas agrícolas con vegetación natural	312606	13.6
11- Suelo desnudo	7647	0.3
12- Agua	15062	0.7

aquellas áreas más inaccesibles y con menor potencial para la agricultura. Finalmente, los bosques constituyen únicamente el 10.1 % de la superficie total, y de ellos son dominantes los bosques de coníferas, más resistentes y adaptados a los rigores edáficos y climáticos del valle.

Una de las principales características del sector central del valle del Ebro es la escasa población que mantiene, con una baja densidad y una gran concentración del hábitat (Frutos, 1982). La gran limitación que introduce el medio hace que la rentabilidad agraria sea muy escasa, siendo necesarias grandes explotaciones para asegurar una mínima renta. Esto supone que dominen los amplios campos extensivos de cereal de secano, que en las tierras bajas representan un muy importante porcentaje superficial. Las estadísticas agrarias del año 2003 indican que 801978 ha están ocupadas por tierras de secano (55.4 % del total). El 29 % del total corresponde a cultivos herbáceos de secano, el 18.1 % a barbechos tradicionales y tierras abandonadas y el resto (8.3 %) a cultivos permanentes, siendo dominantes los viñedos (sobre todo en el campo de Borja y Cariñena) y olivares (en el Bajo Aragón). En el caso de los secanos, dominan esencialmente los cultivos cerealísticos, fundamentalmente trigo y cebada, siendo el sistema de cultivo más común la rotación cereal-barbecho, con un largo barbecho de entre 16 y 17 meses. Hay que señalar que sólo los años lluviosos ofrecen garantías suficientes para el campo (Cuadrat, 1986), existiendo una dependencia importante de las cosechas con relación a las precipitaciones de octubre-noviembre y abril (De los Ríos, 1984).

Respecto a la vegetación natural, ésta se encuentra muy degradada debido a la acción humana, pero representa un importante porcentaje en el total del área de estudio (> 35 %). Esta vegetación corresponde al mundo mediterráneo y desde un punto de vista bioclimático la práctica totalidad del área de estudio se puede incluir dentro del piso mesomediterráneo. Las formaciones vegetales que se pueden encontrar en el valle, desde el centro a los somontanos, son la estepa central, el lentiscar, coscojar y carrascal, además, conviviendo con todos estos tipos de vegetación hay que considerar los pinares de pino carrasco (*Pinus halepensis*). Buena parte de estos bosques son fruto de repoblaciones forestales, como las realizadas en las sierras de Alcubierre y en los montes de Zuera, así como en el somontano oscense, con la finalidad de proteger el suelo y evitar su degradación (Chauvelier, 1990). Dentro de la vegetación natural también se deben incluir los sotos y bosques de ribera ubicados en las llanuras de inundación de los grandes ríos. Sin embargo, las áreas de vegetación natural en estos sectores son escasas, ya que en ellas predominan los cultivos de regadío.

En el sector prepirenaico se reconocen los pisos característicos de la montaña, con un piso basal en el que dominaría el quejigo hasta los 1000 metros aproximadamente. En el piso montano dominarían los pinares, e incluso se identifican áreas testimoniales del piso subalpino con algunos sectores de pastos supraforestales creados por la acción humana (Ferrer, 1988). En el sudeste, dentro del área que corresponde a los puertos de Beceite, se produce un predominio de los pinares, auténticas masas forestales, bien conservadas y constituidas por la asociación de pino silvestre y laricio, y la abundante presencia de boj (Mensua, 1981).

Ya en los somontanos, dentro del piedemonte oscense, aparecen masas de encinares, pero en las zonas más degradadas esta especie es sustituida por el coscojar, que convive con áreas de pino carrasco introducido mediante repoblaciones. En general, el dominio de la encina (> 700 m) está muy alterado y solamente permanecen bosquetes aislados, siendo dominante la coscoja o el boj. Estos coscojares se mantienen por encima de los 400 metros, ya que la coscoja no resiste las bajas temperaturas causadas por las inversiones térmicas.

En el resto de la depresión, sobre suelos yesíferos, se conforma una gran estepa con amplias áreas de suelo desnudo. Estas estepas se caracterizan por el predominio de especies leñosas, asentadas sobre suelos pobres con elevados contenidos de yeso y sales. El paisaje se caracteriza por la ausencia de un estrato arbóreo, dominando los matorrales de escaso porte y las plantas herbáceas anuales. La homogeneidad y monotonía paisajística enmascara un complejo mosaico de comunidades vegetales que responde a pequeñas variaciones geomorfológicas o edáficas.

Estas estepas se caracterizan, en general, por presentar una elevada degradación, ya que buena parte de los espacios llanos han sido puestos en cultivo. Sin embargo, en los enclaves que se conservan existen áreas de gran valor ecológico y ambiental: Belchite-Mediana, Saso de Osera, Bardenas reales y la zona junto a Zuera y Villanueva de Gállego. Sólo en Monegros existen cerca de 1000 especies vegetales, algunas endemismos de distribución restringida (Pedrocchi, 1998).

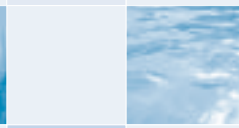
Las características climáticas determinan la dinámica vegetal natural en estos espacios esteparios (Pedrocchi, 1998). De febrero a marzo o abril florecen los matorrales, que gracias a su acumulación de agua les basta un poco de humedad para iniciar su crecimiento, luego se desarrollan las pequeñas plantas herbáceas en un corto periodo de tiempo, coincidiendo con las primeras lluvias primaverales y con un aumento térmico. No

superan los 10 cm de altura y sus raíces rara vez los 20 cm, por lo que en junio ya se encuentran secas. Los matorrales presentan un desarrollo óptimo en mayo, y generalmente detienen su crecimiento en julio. No obstante, algunos años en los que las precipitaciones otoñales son importantes vuelven a reverdecer en septiembre u octubre, coincidiendo con una nueva extensión de las especies herbáceas, menos numerosa que en primavera.

La variabilidad pluviométrica introduce cambios significativos en el paisaje del sector central del valle del Ebro. Aquellos años de lluvias abundantes las especies anuales son muy numerosas, mientras que en los años secos el número de especies queda considerablemente reducido. Braun-Blanquet y Bolós (1954) ya señalaban que en los mismos parajes en mayo de 1954 se encontraban 50 especies o más en 4 m^2, mientras que en 1949, año muy seco, no se contabilizaban más de 5-8 especies.

Así pues, tanto la existencia de un sustrato litológico que facilita la infiltración, dificulta la acumulación de agua y no permite el desarrollo de suelos ricos y profundos, como la presencia de unas condiciones climáticas duras, entre las que destacan las bajas y variables precipitaciones, una alta continentalidad y contrastes térmicos acusados, hacen que las condiciones para el desarrollo de la vegetación sean muy duras. Incluso, en algunas ocasiones, las especies vegetales y los cultivos se ubican cerca de sus límites ecológicos de distribución. Todo esto hace que los prolongados e intensos periodos secos sean muy graves, pudiendo limitar realmente las posibilidades de desarrollo de la vegetación.

fuentes de información y metodología



3. Fuentes de información y metodología

3.1. La información climática

Para determinar las consecuencias de las sequías es preciso identificar dicho fenómeno climático en el tiempo y el espacio. Para ello es necesario contar con información pluviométrica que se sintetiza mediante índices de sequía (Heim, 2002). Las precipitaciones (su ausencia o descenso relativo) es el principal factor que explica la aparición de las sequías (Keyantash y Dracup, 2002; Guttman, 1998). Por esta razón, se ha utilizado información climática (precipitaciones) procedente de la red de observatorios del Instituto Nacional de Meteorología.

La información climática suele presentar importantes problemas de calidad relacionados con la cobertura espacial (Vicente-Serrano *et al.,* 2003) o temporal de los registros (Peterson *et al.,* 1998). No obstante, y a pesar de estos problemas, en la Península Ibérica se dispone de una red de observatorios lo suficientemente densa como para caracterizar climáticamente el territorio durante los últimos años, pudiendo determinar el comportamiento espacial de la dinámica climática durante las 2 o 3 últimas décadas con una gran fiabilidad. En total se dispuso de 380 observatorios pluviométricos.

Los datos mensuales se computaron en los observatorios y meses en los que se disponía de toda la información diaria. Una vez obtenidas las series mensuales se planteó el problema de su longitud que es, por lo general, demasiado corta, y en múltiples ocasiones con un gran número de lagunas temporales. El problema radica, en la mayor parte de las ocasiones, en el cambio de localización del observatorio pluviométrico a lo largo de los años, por lo que es común encontrar para una misma localidad diferentes observatorios. Pero no sólo eso; además existen observatorios donde se registran datos durante un periodo determinado, se dejan de tomar un tiempo, y vuelven a registrarse más adelante. En nuestro caso, y debido al índice de sequía que seleccionamos para trabajar, resultaba necesario contar con 50 años de registros (Guttman, 1999), por lo que hubo que llevar a cabo una adecuada depuración y tratamiento de la información pluviométrica.

Fue necesario realizar la unión de diferentes series ubicadas en distintos observatorios dentro de una misma localidad, es decir, proceder a la reconstrucción de series únicas a partir de los "retales" que constituyen diferentes observatorios. No obstante, este procedimiento no está exento de dificultades, ya que la creación de series temporales

continuas mediante la unión de observatorios plantea frecuentes problemas de homogeneidad (Peterson *et al.,* 1998). Además, hay que señalar que pueden producirse inhomogeneidades por causas ajenas al proceso de reconstrucción, debido a la intervención humana, que perturba los registros tomados en las estaciones climáticas. Entre las actuaciones que producen estas inhomogeneidades, hay que contar con el cambio de ubicación de un observatorio meteorológico dentro de la misma localidad, el cambio de observador, el aparato de medición, etc.

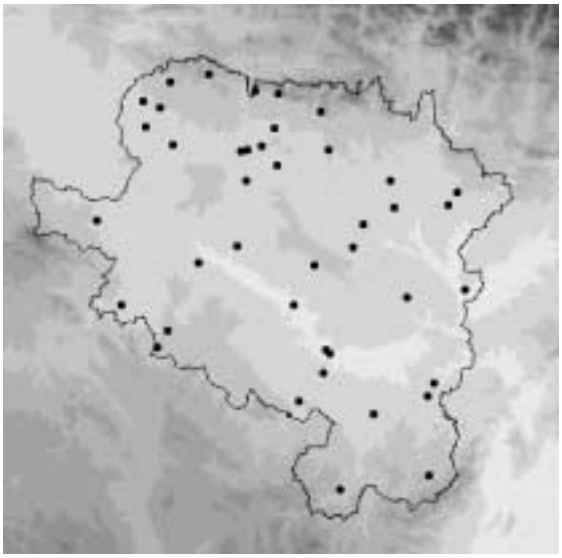
La mayor parte de las inhomogeneidades son descritas como cambios bruscos en los valores medios, aunque no exclusivamente, pudiendo identificarse también cambios de tendencia (Alexandersson y Moberg, 1997), fundamentalmente a causa de efectos urbanos o cambios en el medio circundante a la estación (Karl y Williams, 1987). Estas inhomogeneidades pueden causar errores en la posterior interpretación del comportamiento climático. Por ello, además del proceso de reconstrucción de series pluviométricas hay que descartar posibles tendencias o cambios temporales de las series climáticas, debidas a factores antrópicos, para garantizar que los posteriores resultados obtenidos obedecen, exclusivamente, a un comportamiento climático.

Tras la reconstrucción de las series se aplicó un test para identificar posibles datos erróneos. En primer lugar se identificaron los datos de cada mes que presentaran un valor de precipitación por encima de 4 desviaciones estándar respecto a los observatorios en los que se disponía de registros en dicho mes. Estos datos se etiquetaron y se comprobó uno por uno si existían coincidencias con observatorios cercanos. En el caso de que se tratara de un claro dato extremo, por disparidades importantes con los observatorios cercanos, se eliminó el dato. Solamente se estableció una excepción; en los meses estivales (julio y agosto) no se eliminaron dichos extremos por el carácter localizado e intenso de las precipitaciones.

Tras este proceso de control de calidad, las series pluviométricas contenían lagunas de información en determinados meses. Por ello, el siguiente paso en el proceso de creación de las series de precipitaciones fue el relleno de lagunas. Para ello se seleccionaron aquellos observatorios que contaran con menos del 15% de sus datos mensuales perdidos en el periodo de 1950 a 2000. Los observatorios disponibles quedaron en 41. Aunque el número se reduce considerablemente, se procuró que hubiera observatorios representativos de diferentes ámbitos climáticos del área de estudio, que permitieran un análisis espacial adecuado de las condiciones de sequía. En la figura 5 se muestra la localización de las series seleccionadas.

figura 5

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS 41 OBSERVATORIOS PLUVIOMÉTRICOS SELECCIONADOS



En cada uno de los 41 observatorios se testó si había inhomogeneidades climáticas. Para esta identificación se aplicó el *SHNT* (Alexandersson y Moberg, 1997) en su variante más utilizada, donde únicamente se tienen en cuenta posibles rupturas en las medias entre unos y otros periodos. Aquellas inhomogeneidades que aparecían en los 10 años finales o iniciales no se tuvieron en cuenta (González-Hidalgo *et al.,* 2002). Igualmente, tampoco se aceptaron las inhomogeneidades en los meses estivales: julio y agosto, debido a la elevada variabilidad que puede tener la pluviometría de estos meses.

Tras el proceso de homogeneización se dio por terminado el proceso de control de calidad y depuración de los datos pluviométricos disponibles para el posterior análisis de las sequías. El resultado final fueron 41 observatorios pluviométricos con registros desde enero de 1947 hasta diciembre de 2000, con una calidad y homogeneidad contrastadas.

Las 41 series pluviométricas homogéneas, que representan la práctica totalidad del territorio, constituyen la base fundamental para identificar espacio-temporalmente

las sequías, así como su intensidad y magnitud antes de analizar sus consecuencias sobre los sistemas naturales y agrarios.

3.2. Identificación de la dinámica vegetal mediante imágenes de satélite

Los ecosistemas mediterráneos son muy susceptibles a los cambios debidos a factores ambientales o antrópicos (Ibáñez *et al.,* 1997). Por esta razón, la gestión ecológica y ambiental de estos espacios presenta un interés creciente, siendo necesaria una adecuada cuantificación de las consecuencias de determinados procesos en los que ha intervenido el hombre, como la erosión, o las de determinados fenómenos naturales que se repiten, de forma más o menos cíclica, como las sequías.

Debido a las limitaciones técnicas y a las carencias de información, los estudios sobre la dinámica de los ecosistemas mediterráneos suelen reducirse al análisis de pequeñas áreas, por medio de parcelas experimentales, simulaciones o muestreos; ello restringe la disponibilidad de series temporales lo suficientemente largas. Por ello, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden suponer un avance para este tipo de estudios, permitiendo análisis temporales continuos y que cubren áreas más extensas (Paracchini *et al*., 1998; Kogan, 1995 y 1997; Slayback *et al.,* 2003).

Las imágenes de satélite se han utilizado en el análisis de las consecuencias de diferentes procesos, como la desertificación (Nicholson *et al.,* 1998; Pickup, 1998) o los cambios de uso del suelo (Serra *et al.,*2003). También se han utilizado ampliamente para el análisis de la influencia del clima sobre la dinámica de la vegetación natural y de los cultivos (Yu *et al.,* 2003; Justice *et al.,* 1986; Cihlar *et al.,* 1991; Santos y Negrín, 1997; Farrar *et al.,* 1994), mereciendo una especial atención las consecuencias de aquellos fenómenos extremos, fundamentalmente las sequías (Kogan, 1995; Gutman, 1990; Walsh, 1987). Ji y Peters (2003) han comparado la información que sobre la dinámica vegetal puede obtenerse de las imágenes de satélite con índices climáticos de sequía, comprobando, en las regiones centrales de EE.UU., una estrecha relación entre ambos parámetros. Con relación a los impactos de las sequías, Teiszen *et al.* (1997) documentaron una sustancial reducción de los índices de vegetación en las grandes llanuras americanas los años en los que se registran condiciones secas. Walsh (1987) comprobó en el estado de Oklahoma (EE.UU.) la existencia de una estrecha relación entre el índice de sequía de Palmer y el valor de los índices de vegetación obtenidos del satélite NOAA-6. Este autor identificó valores más altos del NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

los años en los que el índice de Palmer es positivo. Igualmente, Peters *et al.* (1991) investigaron las relaciones existentes entre el NDVI y las condiciones de sequía en Nebraska, comprobando que el NDVI y los índices meteorológicos de sequía tienen una importante relación estadística.

Hay que tener en cuenta que en los espacios semiáridos con cubiertas y densidades vegetales bajas se hace difícil la detección de cambios a gran escala temporal a partir de, por ejemplo, series de fotografías aéreas. Pero además, los estudios son escasos y las bases de datos procedentes de muestreos o parcelas experimentales son fragmentarias, locales, e insuficientes para cumplir los objetivos de este trabajo. Por estas razones, para comprobar los cambios y las consecuencias de las sequías sobre la cubierta vegetal a gran escala temporal y espacial, es necesaria la utilización de la teledetección y, por extenso, de las series temporales de imágenes de satélite.

3.2.1. Las características espectrales de la vegetación

En general, la mayor parte de técnicas en las que se basa la teledetección espacial se fundamentan en la reflexión hacia el espacio de un porcentaje de energía electromagnética procedente del sol, que será variable en función de las diferentes superficies y su estado físico, así como de las distintas regiones del espectro electromagnético. Esta energía se recoge por sensores que se encuentran a bordo de satélites de observación terrestre.

La cuantificación y el análisis de la vegetación por medio de imágenes de satélite es posible gracias a determinadas propiedades físicas de la vegetación, que pueden captarse de forma remota con una gran frecuencia temporal, y cubriendo amplios espacios. El desarrollo y dinámica vegetal están directamente relacionados con el porcentaje de radiación electromagnética procedente del sol absorbida por la vegetación en sus procesos fotosintéticos, el agua disponible y la eficacia en el uso de la energía por parte de las plantas (Chuvieco, 2002). En función de una serie de factores las propiedades radiométricas de la vegetación cambian. Algunos de estos factores son estructurales (tipo de vegetación, suelo sobre el que se asienta, topografía, etc.), mientras que otros factores son puntuales en el tiempo: las condiciones climáticas y las actividades humanas.

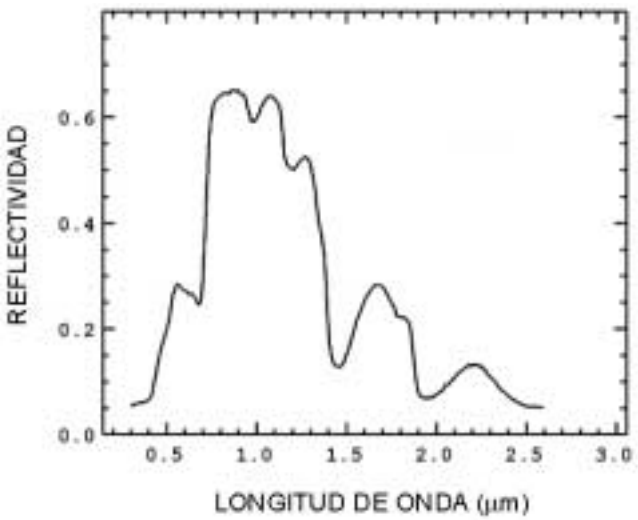
El proceso resulta sencillo. Cuando la energía electromagnética incide sobre las hojas, una parte de esta energía es reflejada y el resto se absorbe o es transmitida. Sin embargo, la respuesta de la vegetación a la energía recibida en diferentes longitudes de onda es distinta. En la figura 6 se muestra una signatura espectral característica de la

cubierta vegetal. En la región visible del espectro (0.4 – 0.7 mm) se registra una gran absorción de la energía electromagnética, debido a los pigmentos vegetales (Knipling, 1970) y al consumo de esta energía para llevar a cabo los procesos de fotosíntesis e intercambios gaseosos con la atmósfera. En cambio, en la región espectral del infrarrojo cercano (0.7 – 1.3 mm) se registra una elevada reflectividad.

Esta mayor reflectividad en la región espectral del infrarrojo cercano está causada por la propia estructura interna de las hojas. La cutícula es casi transparente a la radiación visible e infrarroja, y un escaso porcentaje de la energía solar es reflejada por la superficie. Sin embargo, en el rango de 0.7 a 1.3 mm existe una escasa absorción interna, y el mayor porcentaje de la radiación es reflejada.

figura 6

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO CARACTERÍSTICO DE LA VEGETACIÓN ACTIVA Y SANA.



Las propiedades reflectivas de la vegetación no sólo permiten la identificación del porcentaje de cubierta vegetal en una imagen, sino que también posibilitan conocer el estado en el que se encuentra la vegetación; si está sana y activa o bien, si está afectada por enfermedades o por condiciones de estrés hídrico. Por ejemplo, cuando las plantas se encuentran en su periodo de senescencia o se ven sometidas a condiciones de estrés hídrico, disminuye la reflectividad en la región del infrarrojo cercano.

Gracias a las propiedades reflectivas de la vegetación en las regiones espectrales del visible e infrarrojo cercano se puede realizar un seguimiento temporal de la cubierta y determinar los periodos de tiempo y/o los espacios en los que la actividad vegetal es baja. Para ello se suele resumir la información espectral por medio de los llamados índices de vegetación (Gilabert et al., 1997). Estos índices se traducen en una combinación de bandas espectrales con el objetivo de resaltar el componente vegetal de la imagen, de tal modo que las áreas de mayor cubierta vegetal o aquellas en las que la vegetación muestre una actividad superior aparezcan resaltadas y con valores superiores al resto.

Los esfuerzos dedicados al desarrollo y validación de diferentes índices de vegetación se han traducido en una extensa bibliografía sobre el tema y en una gran cantidad de indicadores. Entre los índices de vegetación más utilizados hay que destacar el cociente entre las bandas de la región espectral del infrarrojo cercano y el rojo, conocido como RVI, el índice de vegetación normalizado (NDVI), el índice de vegetación perpendicular (PVI), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), el índice de vegetación atmosféricamente resistente (ARVI), etc. En Baret y Guyot (1991) o en Bannari et al. (1997) se realiza una extensa revisión de estos índices y de otros más, además de una descripción de sus potencialidades y limitaciones para el seguimiento de la cubierta vegetal.

A pesar de esta diversidad de indicadores, el índice más extendido y utilizado, debido a su sencillez y a que demanda una escasa información espectral, que es registrada por una gran parte de los sensores disponibles en la actualidad, es el índice de vegetación normalizado (*Normalized Difference Vegetation Index,* NDVI), cuya formulación es:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

Siendo, ρ_{IRC} la reflectividad en la región espectral del infrarrojo cercano y ρ_R en la región espectral del rojo. El NDVI está condicionado por el grado de absorción en la región del rojo, que es proporcional a la densidad de clorofila, y por la reflectividad en el infrarrojo cercano, que es proporcional a la densidad vegetal. Cuanto más altos sean los valores del índice mayor es la actividad vegetal.

Existen dos características del NDVI que lo hacen ideal para el seguimiento de las condiciones de la vegetación; por un lado, ninguna otra superficie exhibe mayores valores de NDVI que las superficies vegetales y, por norma general, cuanto mayor es el valor de NDVI la actividad vegetal es más alta; por otro lado, cuando la actividad vegetal se

detiene o ralentiza y desciende el vigor vegetal, como consecuencia de la propia naturaleza del crecimiento vegetal, o por condiciones de estrés hídrico causadas por las sequías, se producen descensos del NDVI (Tucker y Choudhury, 1987).

Numerosos autores han puesto de manifiesto la estrecha relación existente entre el NDVI y algunos parámetros ecológicos, como el índice de área foliar (Baret y Guyot, 1991; Carlson y Ripley, 1997), la cantidad de biomasa vegetal (Tucker *et al*, 1981 y 1983; Gutman, 1991; Cihlar *et al.*, 1991; Diallo *et al.*, 1991; Wylie *et al*., 2002; Curran, 1980; Tucker *et al.,* 1981; Asrar *et al.,* 1984) o la proporción de cubierta vegetal (Gillies *et al.,* 1997; Duncan *et al.,* 1993).

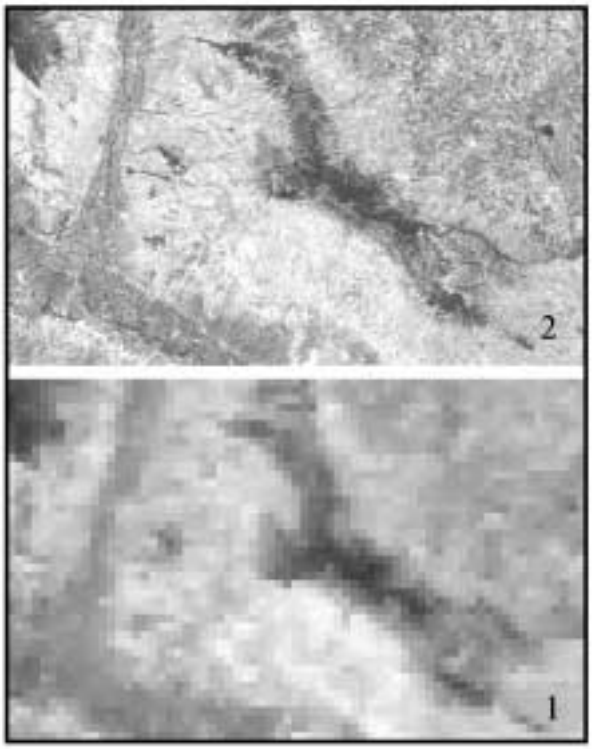
3.2.2. Las imágenes AVHRR procedentes de la serie de satélites NOAA

El análisis espacio-temporal de la cubierta vegetal por medio del NDVI se ha realizado mediante las imágenes procedentes de diferentes plataformas satelitales, e incluso por medio de mediciones en tierra a partir de radiómetros ubicados en superficie. Existe una multitud de plataformas y sensores con la información espectral necesaria (infrarrojo cercano y rojo) para el cálculo del NDVI: NOAA, Landsat, SPOT, IRS, TERRA, etc. (Chuvieco, 2002).

La resolución espacial con la que se recoge la información es muy diferente entre el primero de los satélites (NOAA) y el resto. El primero se considera un satélite de baja resolución espacial (pixeles de 1 km^2), mientras que el resto tienen una resolución superior en las regiones del infrarrojo cercano y el rojo (ente 20 y 75 m de resolución espacial). El detalle espacial que permiten identificar las diferentes plataformas queda reflejado en la figura 7. En esta figura se muestran dos imágenes del día 17 de marzo de 2000, una obtenida por medio del sensor ETM+, a bordo del satélite Landsat-7, y otra por medio del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA-14. Ambas imágenes corresponden a la misma área que engloba el sector central del valle del Ebro, con los corredores de campos de cultivo de los valles del Ebro y Gállego, zonas de matorrales y pastizales sobre suelos yesíferos, campos de cultivo y los bosques de coníferas de las sierras de Alcubierre y montes de Zuera (sector noroeste). El detalle espacial que permite la imagen ETM+ es muy superior, ya que tiene una resolución espacial de 30 m. Frente a ello, a partir de la imagen AVHRR se pueden delimitar los rasgos generales de la vegetación, pero no se pueden percibir matices más particulares ya que la resolución espacial de los píxeles es de 1 km^2.

figura 7

EJEMPLO DE RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LOS SENSORES 1: NOAA-AVHRR, 2: LANDSAT-ETM+. 17 DE MARZO DE 2000.



Una resolución espacial alta, como la que ofrece el sensor ETM+, permite analizar en mayor detalle la dinámica vegetal y los posibles impactos de las sequías. Sin embargo, hay una serie de aspectos que limitan la posible utilización de los satélites de alta resolución espacial para el análisis de la dinámica vegetal. El primero de ellos es el precio de las imágenes, muy elevado. En segundo lugar, la cobertura temporal de los satélites. Para determinadas aplicaciones a escalas regionales o locales, como el análisis de la dinámica vegetal, es necesaria una cobertura temporal que solamente permiten los satélites NOAA, ya que mientras estos satélites pueden obtener observaciones diarias, los satélites de alta resolución como Landsat o SPOT presentan ciclos de 16 y 26 días, respectivamente. Debido a la frecuente cubierta nubosa en nuestras latitudes, la resolución temporal se reduce considerablemente, siendo común la ausencia de imágenes válidas durante varios meses.

Así pues, debido a su mayor frecuencia temporal y a su reducido coste, el mayor porcentaje de análisis centrados en la dinámica vegetal y en el impacto de las sequías han utilizado imágenes de los satélites NOAA-AVHRR. La resolución espacial de las imágenes AVHRR (sobre 1.1 km en el nadir) se ha mostrado suficiente para investigar los cambios vegetales a escalas regionales o globales. Se ha comprobado que el NDVI a una escala espacial de 1 km es una fiel integración del NDVI a escalas menores dentro de ese píxel, por lo que no se produce una pérdida significativa de información (Aman *et al.,* 1992). Además, la utilización de imágenes de baja resolución espacial también tiene importantes ventajas. Por ejemplo, Jasinski (1990) indicó que cuanto mayor es el tamaño del píxel menores son los problemas que introduce el suelo sobre el NDVI, así como las sombras que produce la vegetación. Igualmente, Burgess *et al.* (1995) comprobaron que los errores que introduce la topografía y el relieve en los valores de NDVI, como consecuencia de las sombras, son altos a partir de la información que reportan los satélites de alta resolución espacial (sobre el 13.5 % a una resolución espacial de 50 m), pero que estos errores se reducen marcadamente a la escala de 1 km (3 %).

Las investigaciones más recientes han demostrado que las imágenes de los satélites meteorológicos, especialmente los obtenidos por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), mediante los sensores AVHRR, permiten una oportunidad única para cartografiar, seguir y evaluar las condiciones de la vegetación terrestre. La adquisición diaria de imágenes de satélite hace que los datos AVHRR sean muy útiles para estudios temporales, y la resolución espacial ha mostrado que el sensor es muy adecuado para el estudio de procesos y fenómenos regionales, continentales o globales (Ehrlich *et al.,* 1994).

No obstante, a pesar de las ventajas que presentan los satélites NOAA-AVHRR, hay que contar con una serie de aspectos que es necesario corregir, algunos de ellos también comunes a otros tipos de satélites (como es el caso de la necesidad de llevar a cabo correcciones atmosféricas o geométricas) y otros más específicos de los satélites NOAA, (como la degradación de las órbitas y sensores, cambios de satélite, o la amplitud de las imágenes y los ángulos de escaneo).

La precisión de los datos de NDVI derivados de los satélites NOAA-AVHRR es una compleja función de la adquisición de datos y del sistema de proceso (Goward *et al.,* 1993). El sistema incluye correcciones atmosféricas (Paltridge y Mitchell, 1990), calibración del sensor (Che y Price, 1992; Kaufman y Holben, 1993); variaciones en el color del suelo (Huete y Tucker, 1991) y los impactos de la reflectividad bidireccional (Gutman, 1991).

El tratamiento previo de las imágenes NOAA-AVHRR y los procesos de corrección que es necesario llevar a cabo son mucho más complejos que los de cualquier otro satélite (Gutman *et al.,* 1987; Che y Price, 1992; Schultz y Halpert, 1995). El uso de las imágenes NOAA-AVHRR presenta importantes problemas relacionados con la degradación de la órbita a lo largo del tiempo y por el deterioro del sensor AVHRR, lo que supone que las series resultantes presenten algunas tendencias temporales (Kogan y Zhu, 2001). Además, los canales solares del sensor AVHRR no son calibrados en vuelo y hay que ser cuidadoso con los coeficientes de calibración post-lanzamiento que se apliquen (Rao y Chen, 1994).

Los satélites NOAA tienen unos coeficientes de calibración desarrollados en la fecha del lanzamiento que no son revisados, y no se consideran los procesos de degradación de las órbitas. Por ello, la calibración de los canales solares ha sido considerado como el más serio problema de los datos AVHRR, unido a los cambios de satélite (Gutman e Ignatov, 1995). Los canales 1 y 2 del sensor AVHRR se han degradado a lo largo del tiempo de forma diferencial (Che y Price, 1992). Por ejemplo, Holben *et al.* (1990) señalaron que el NDVI medido con el sensor NOAA-9 se incrementó 0.0083 unidades por año debido a esta causa, y el cambio al NOAA-11 en 1988 supuso un salto brusco de 0.056 unidades de NDVI, aspecto registrado en áreas no vegetadas de los desiertos de Libia y Egipto (Kaufman y Holben, 1993). Pero el problema es todavía más complejo, ya que también se produce una degradación del sensor, siendo diferencial entre los canales 1 y 2 del AVHRR (Los, 1998). Este hecho causa un descenso en la precisión con la que mide el sensor y con el tiempo causa cambios significativos en las medidas de NDVI. Kaufman y Holben (1993) señalaron que la ganancia desciende aproximadamente un 10 % entre el momento anterior y posterior al lanzamiento en los satélites NOAA-7 y NOAA-9; mientras que el satélite NOAA-11 presentó todavía un mayor descenso en la ganancia (22 % y 32 % en el rojo e infrarrojo cercano, respectivamente). Los coeficientes de calibración prelanzamiento obtenidos por la NOAA no tienen en cuenta esta degradación de los sensores, por lo que si no se realizan adecuadas correcciones, la validez de las conclusiones resultantes de las comparaciones interanuales pueden verse seriamente comprometidas. En este sentido, Price (1987) mostró que los índices de vegetación computados a partir de observaciones sin calibrar, o con los coeficientes de calibración prelanzamiento, no pueden ser comparados entre diferentes sensores, ni incluso entre los de una misma familia de satélites NOAA-AVHRR.

Además de estos errores artificiales, hay que considerar otro tipo de perturbaciones, en este caso naturales, pero que interfieren la relación existente entre las mediciones de satélite y el estado real de la cubierta vegetal, afectando a la estabilidad de las

series. La más importante de ellas son las erupciones volcánicas, que también contribuyen a la ausencia de uniformidad de las series temporales, debido a que los aerosoles estratosféricos producidos por las erupciones tienen un fuerte y persistente impacto sobre las radiancias observadas, principalmente en los canales solares (Stowe *et al.,* 1992). Entre las erupciones que han tenido mayores efectos sobre las series de imágenes de satélite hay que destacar la explosiva del monte Pinatubo (Filipinas) en 1991. Esta erupción provocó un importante incremento del contenido de aerosoles en la atmósfera (Figura 8).

figura 8

EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AEROSOLES EN LA ATMÓSFERA ANTES Y DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN DEL MONTE PINATUBO (OBTENIDO DE SCHULTZ Y HALPERT, 1995)

Para solucionar todos estos problemas de las imágenes NOAA-AVHRR existen diferentes procedimientos, que suelen estar encadenados dentro de una secuencia más o menos automática. Se han realizado significativos avances en los procesos de georreferenciación, calibración, corrección atmosférica o en la identificación de nubes. Pero es en el caso de la calibración de los sensores donde se han dedicado mayores esfuerzos. Diferentes trabajos se han dedicado a la obtención de coeficientes de calibración que corrigen la degradación de los canales 1 y 2 del AVHRR mediante mediciones en el desierto (Holben *et al.,* 1990; Kaufman y Holben, 1993) o en el océano (Vermote y Kaufman,

1995). NOAA/NESDIS ha desarrollado coeficientes de calibración post-lanzamiento (Rao y Chen, 1994 y 1999). Este proceso elimina la tendencia de los canales 1, 2 y del NDVI en los datos finales.

Tras la calibración de las imágenes mediante coeficientes de calibración post-lanzamiento, Kogan y Zhu (2001) señalan que los errores por cambio de satélite y por la inestabilidad de las órbitas son inferiores al 15 %, y solamente ofrecen problemas con los cambios de satélite en las áreas desérticas y en las áreas selváticas con importante cubierta vegetal.

Tras la calibración también se han producido importantes avances en la corrección de las perturbaciones introducidas por la atmósfera (Chávez, 1988; Kaufman y Tanré, 1996). Goward *et al.* (1991) indicaron que los valores de NDVI registrados mediante el sensor AVHRR pueden llegar a ser un 30 % inferiores (0.3 unidades de NDVI) que las medidas en tierra, debido a la atenuación atmosférica. El NDVI queda resaltado, y con mayor riqueza espacial, al eliminar estas perturbaciones; y con relación al objetivo de identificar los efectos del estrés hídrico y la sequía, Singh y Saull (1988) comprobaron que en áreas de bosques de coníferas los valores de NDVI sin corrección atmosférica no muestran bien los efectos del estrés hídrico, aspecto que limita su utilidad con estos propósitos.

Pero entre todos los avances para el desarrollo de adecuadas series de imágenes de NDVI, procedentes de los sensores AVHRR, destaca un sencillo procedimiento para depurar las imágenes de errores residuales, tanto atmosféricos como geométricos. Se trata de la utilización de técnicas de composición de imágenes, que consisten en la creación de una única imagen a partir de los datos disponibles en diferentes imágenes diarias. Para la mayor parte de propósitos con los que se utilizan las imágenes AVHRR es innecesaria una resolución temporal diaria por lo que, para minimizar los errores y garantizar su mayor validez se generan compuestos, siendo el más común de ellos la selección del máximo valor en un píxel determinado a lo largo de un periodo de tiempo concreto, una semana, diez días, un mes, etc.

Holben (1986) demostró que los compuestos realizados mediante máximos en un determinado periodo de tiempo reducen la influencia de las nubes, el efecto de los diferentes ángulos de visión e iluminación y la mayor o menor existencia de aerosoles en la atmósfera. Este autor comprobó que los valores más altos de NDVI tienden a producirse cerca del nadir y con pequeños ángulos de incidencia solares, donde las variaciones angulares en la respuesta del sensor son minimizadas. Holben (1986) señala que la pro-

babilidad de que una escena sea recogida por el sensor AVHRR con condiciones óptimas, es decir, que sea tomada en el nadir, no presente nubes y muestre una atmósfera clara es de únicamente del 1.3 %, aspecto que justifica la utilización de compuestos que reducen el efecto de los aerosoles y los diferentes ángulos de incidencia. La técnica de compuestos tiende a seleccionar los pixeles que han sido tomados en condiciones más óptimas, cerca del nadir y con menos perturbaciones atmosféricas, ya que éstos son los que muestran valores de NDVI superiores.

Así pues, en la actualidad existen medios, técnicas y herramientas lo suficientemente depuradas como para realizar una adecuada corrección de los errores inherentes a la propia toma de datos por parte del sensor, y obtener series calibradas y continuas a lo largo de un número suficiente de años. Esta labor está siendo llevada a cabo por diferentes agencias gubernamentales, fundamentalmente americanas (NASA y NOAA) y por distintos laboratorios asociados a universidades y centros de investigación. De esta forma, en la actualidad existen diferentes series de NDVI globales disponibles.

Para este trabajo no se han utilizado estas series de datos estándar, publicadas, ampliamente utilizadas y validadas a escala global, como las series PAL o GIMMS. A pesar de la libre disponibilidad de estas series, existe un factor que restringe su utilización, y éste se relaciona con la resolución espacial a partir de la que se almacenan estos índices, con resoluciones máximas de 8 km, es decir, pixeles de 64 km^2 de superficie. Este hecho restringe su utilización en el área de estudio, ya que el detalle espacial resulta muy escaso. Por ejemplo, se testó inicialmente la posibilidad de utilizar la serie PAL a una resolución de 0.1º, que está disponible en http: //daac.gsfc.nasa.gov, pero se comprobó que su resolución espacial es insuficiente para reflejar la diversidad espacial de cubiertas y usos del suelo que presenta el sector central del valle del Ebro.

Por esta razón, se consideró trabajar con una serie de índices de vegetación obtenida a la resolución que permite el sensor (1 km^2). Para ello se recurrió al Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV), que dispone de una antena receptora HRPT-NOAA y una serie de índices de vegetación de toda la Península Ibérica a una resolución espacial de 1 km^2, desde el año 1987.

El proceso de elaboración de los productos de NDVI en el LATUV tiene en cuenta todos los problemas que presentan las imágenes NOAA-AVHRR planteados con anterioridad y son generadas siguiendo una serie de pasos:

- *Calibración:* El LATUV ha seguido las indicaciones de la NOAA en la calibración de los datos medidos por todos los sensores portados en sus satélites. Los satélites NOAA-9 y NOAA-11 se calibran de acuerdo con la calibración dada por Kaufman y Holben (1993), mientras que para el NOAA-14, dada la degradación sufrida por el sensor AVHRR portado por este satélite, se utiliza una ecuación que varía dichos coeficientes (Rao y Chen, 1999; NOAA, 2003).

- *Corrección atmosférica:* Para la corrección atmosférica, el LATUV planteó un modelo operativo basado en el código 5S (Tanré *et al.*, 1990). En lo que concierne a la atenuación atmosférica podemos hablar de dos tipos de factores: los invariables y los variables. En el primero de los casos se encuentra la dispersión molecular y la absorción por parte del ozono. Para los factores invariantes el LATUV utiliza atmósferas estándar propuestas en el Código 5S. En lo referente a los variables, como es el caso del vapor de agua, es necesario conocer los perfiles atmosféricos de temperatura y humedad. Dado que el LATUV genera productos en tiempo real, la alternativa utilizada para su cálculo se basa en la estimación de la cantidad de agua precipitable a partir de la diferencia entre las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 (Illera *et al.*, 1997).

- *Generación del NDVI*: Una vez corregidas atmosféricamente las reflectividades de los canales 1 y 2, se calcula el NDVI.

- *Corrección Geométrica*: Para la corrección geométrica se utiliza un método mixto basado en un modelo orbital y puntos de control. En lo referente al remuestreo de las imágenes, éste se realiza de una sola vez, mediante el método del vecino más próximo (Illera *et al.*, 1996).

- *Creación de los compuestos*: en periodos de 10 días según el método de Holben (1986).

La serie de NDVI construida por el LATUV ha sido testada y ampliamente utilizada para diferentes objetivos en la Península Ibérica: identificación de áreas afectadas por sequía (González-Alonso *et al.*, 1995, 2000 y 2001), determinación de la productividad vegetal y el seguimiento de la vegetación natural (Vázquez *et al.,* 2001), o el riesgo de incendios (Illera *et al.,* 1996b; Calle *et al.*, 2000).

El producto proporcionado por el LATUV ha consistido en los compuestos de NDVI entre 1987 y 2000 para un periodo de 10 días por medio del método del MVC

(Holben, 1986) entre enero de 1987 y diciembre de 2000, de tal forma que se ha dispuesto para el área de estudio de 3 imágenes por mes que en total suman 494 imágenes de compuestos de NDVI a una resolución espacial de 1 km^2, y referenciadas a un sistema de proyección cartográfica UTM-30N. En la figura 9 se muestra una serie consecutiva de dichas imágenes decenales, donde se aprecia, en algunos casos, la ausencia de información como consecuencia de la presencia de cubierta nubosa.

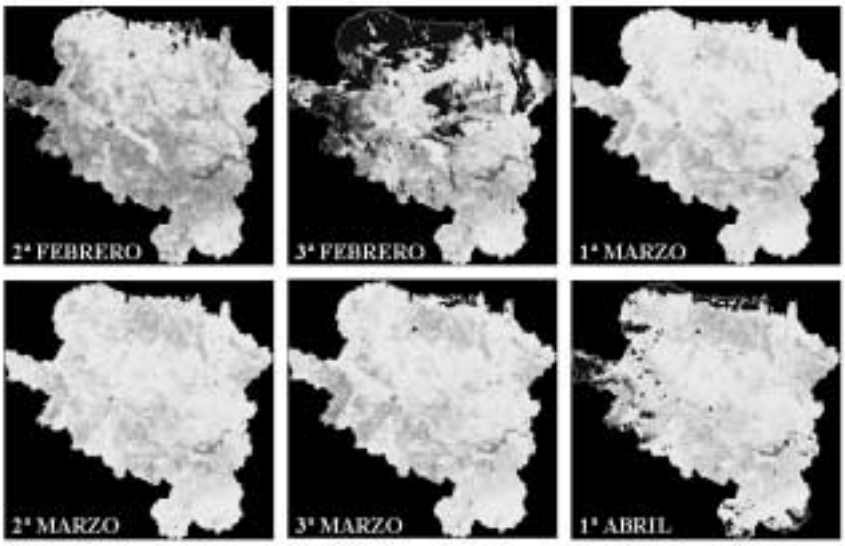
El proceso de elaboración de esta serie de imágenes por parte del LATUV muestra una gran fiabilidad, pero la gran cantidad de lagunas espaciales a lo largo de las series aconsejó reducir la resolución temporal y trabajar con compuestos de carácter mensual. Este hecho plantea una serie de ventajas e inconvenientes. La primera ventaja es que se elimina la mayor parte de las lagunas existentes en las series decenales. En segundo lugar, con esta resolución temporal se pueden realizar comparaciones con los parámetros climáticos (precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración, índices de sequía) cuyo nivel de agregación temporal es mensual.

Sin embargo, trabajar con series mensuales también supone desventajas evidentes, en primer lugar el enmascaramiento de una dinámica vegetal que en algunos casos puede tener una escala temporal corta; se pierden los patrones temporales más específicos para conservar exclusivamente los rasgos más generales de la dinámica vegetal. Pese a ello, se consideró más adecuado trabajar con series continuas espacial y temporalmente, a menor resolución temporal, que contar con series fragmentarias con muchas lagunas espaciales.

Debido a la cubierta nubosa se planteó el problema de no disponer de imágenes completas en algunos meses. A ello hubo que sumar la falta de información durante los meses de octubre a diciembre de 1994, como consecuencia de la avería del satélite NOAA-12. Para solucionar el problema y disponer de una cobertura espacial y temporal completa se optó por rellenar las series de datos mediante procedimientos estadísticos. Diferentes procedimientos han sido desarrollados para el relleno de las lagunas de información en las series de NDVI, siendo el más común la interpolación temporal a partir de los datos de los meses vecinos (Gutman *et al*., 1995). Siguiendo este planteamiento, Bonifacio *et al.* (1993) rellenaron las lagunas de información en una serie de imágenes de NDVI en el Sahel mediante el promedio de los dos vecinos inmediatos en la serie temporal, mientras que cuando se produce un vacío de más de dos vecinos realizan el relleno mediante interpolaciones lineales.

figura 9

EJEMPLO DE LA SERIE DE IMÁGENES DE NDVI UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO. AÑO 1994.



En nuestro caso se optó por la creación de modelos lineales de dependencia basados en regresiones simples entre el dato mensual de cada píxel en un mes concreto y los datos de los meses anteriores y posteriores. La dependencia temporal entre las mediciones puede resultar de gran ayuda para rellenar los datos ausentes de la serie, ya que pueden permitir realizar modelos de regresión para cada uno de los pixeles de la imagen en los que la variable dependiente será el píxel del mes a rellenar, y la independiente será el valor de NDVI del píxel cuya serie mensual se encuentre mejor correlacionada con la del mes a rellenar. Para ello se obtuvieron series de datos mensuales de cada uno de los pixeles del área de estudio, siendo el resultado doce series mensuales por cada píxel, en el periodo 1987-2000.

La validez del método de relleno se testó mediante su aplicación a 4 meses escogidos al azar en los que se disponía de información en toda la imagen (ausencia de lagunas espaciales). Se generaron modelos de dependencia para todos los pixeles de la imagen a partir de los datos de los meses anteriores y posteriores, de tal forma que los datos finales del modelo se compararon con los datos reales medidos por el sensor. En la figu-

ra 10 se muestran cuatro ejemplos de la relación existente entre los datos estimados por los modelos aplicados de relleno y los observados en cada píxel. En general, se observa un aceptable relleno de los datos perdidos, con coeficientes de determinación superiores, en todos los casos, a 0.83.

Una vez rellenados todos los datos de la serie se comprobó su estabilidad temporal y la calidad de las calibraciones temporales aplicadas por el LATUV. Para ello se calculó el promedio mensual de los valores de NDVI en la totalidad del área de estudio y se comparó con la evolución temporal de los valores de una de las series de referencia estándar a escala global, como es la serie PAL, construida por la NASA, y calibrada según los coeficientes calculados por Rao y Chen (1995 y 1999). Los efectos de la degradación de las órbitas, los cambios de sensor en la reflectividad de los canales 1 y 2, y la estabilidad y coherencia de las series temporales de NDVI de la base *Pathfinder Land data Set* (PAL) han sido investigados en profundidad por Kaufman *et al.* (2000). Estos autores concluyen que los datos PAL no presentan una corrupción significativa por estos efectos y, de hecho, los datos de NDVI resultantes pueden ser utilizados sin problemas para determinar la variabilidad interanual en la actividad vegetal. En la figura 11 se muestra la evolución temporal del promedio de NDVI en el sector central del valle del Ebro a partir de las series PAL y la generada por el LATUV. La evolución experimentada por ambas series es similar, con años en los que las curvas de NDVI son mayores o menores, pero en casi todos los casos coincidentes. Las únicas diferencias se observan en los años 1990, 1991 y 1994, donde los máximos anuales de NDVI son un poco superiores en la serie PAL, y en los inviernos entre 1996 y 2000, donde en la serie PAL se registran valores demasiado altos como para poder ser considerados con fiabilidad.

Aunque los compuestos de NDVI tienden a minimizar los efectos de la contaminación nubosa, la variabilidad en el ángulo de escaneo, el ángulo solar, los aerosoles y el vapor atmosférico (Holben, 1986), suele permanecer algún tipo de error residual (Halpert, 1991). Para eliminar errores residuales se aplican técnicas de filtrado temporal (Van Dijk *et al.,* 1987; Kogan y Sullivan, 1993). Gallo y Flesch (1989) analizaron el desarrollo de los cultivos en EE.UU. mediante imágenes NOAA-AVHRR y consideraron el efecto que introduce el filtrado temporal en los perfiles de los índices de vegetación. Los resultados obtenidos por estos autores sugieren la utilización de un filtro en el dominio temporal en mejor medida que utilizar directamente las señales observadas por el satélite.

figura 10

RELACIÓN ENTRE EL NDVI OBSERVADO Y ESTIMADO

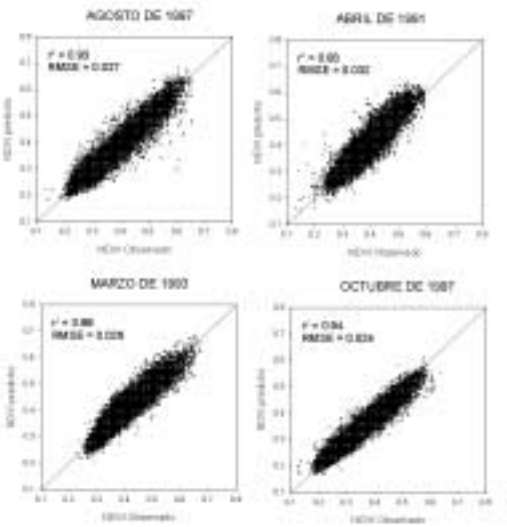
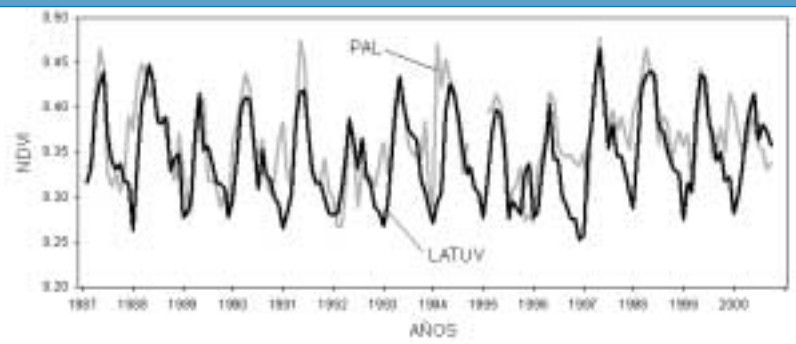


figura 11

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS SERIES DE NDVI-PAL Y LATUV (PROMEDIO DE TODOS LOS PIXELES EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO).



Este planteamiento se considera estándar para numerosas aplicaciones de las series temporales de NDVI. En este trabajo se utilizó el procedimiento planteado por Quarmby *et al.* (1993), cuya formulación es:

$$NDVI_{new\ (n)}=MAX\{NDVI_{(n)},\ (NDVI_{(n-1)}+NDVI_{(n+1)})/2\}$$

Esta formulación filtra los perfiles de NDVI utilizando el promedio de los datos anterior y posterior, pero sólo si el valor original es inferior al promedio del anterior y posterior, suavizando posibles errores. Este proceso, al igual que sucedía con la creación de los compuestos mensuales, reduce la resolución temporal de las series de datos, pero se gana en la fiabilidad de dichas series.

No obstante, estos filtros no se aplicaron a la totalidad de la serie temporal, ya que en el periodo de tiempo analizado (1987-2000) se plantea otro problema de importante magnitud. Tal como se ha señalado anteriormente, en 1991 se produce la erupción explosiva del monte Pinatubo, lo que supuso un importante incremento del nivel de aerosoles en la atmósfera, reduciendo la fiabilidad de las series de NDVI durante un periodo de alrededor de un año a pesar de la aplicación de coeficientes de calibración adecuados (Lucht *et al.,* 2002). El descenso en los valores de NDVI en 1992, como consecuencia de esta erupción, ha sido puesto de manifiesto por numerosos autores (p. ej., Molineaux *et al.,* 1998; Gutman e Ignatov, 1995), y la omisión de estos años en estudios de vegetación es común. Gutman *et al.* (2000), en un estudio sobre la influencia del fenómeno atmosférico de El Niño en la dinámica ambiental en Indonesia, señalan que no resulta aconsejable utilizar los datos posteriores a junio de 1991, debido a las importantes perturbaciones atmosféricas causadas por el monte Pinatubo. Igualmente, Srivastava *et al.* (1997) indican que en la India los valores de NDVI tras junio de 1991 resultaron demasiado bajos en comparación con los valores de precipitación y con los de las cosechas recolectadas. En su caso, la correlación entre los valores de producciones agrícolas y de NDVI era de 0.67 eliminado el año 1991, pero si se incluía este año la correlación disminuía hasta 0.3. A escala global la erupción explosiva del Monte Pinatubo supuso un descenso en los valores de NDVI de alrededor del 20 % (Schultz y Halpert, 1995; Lucht *et al.,* 2002). Por esta razón, de la serie de datos disponibles se eliminaron los meses comprendidos entre septiembre de 1991 y mayo de 1992, momento en el que la proporción de aerosoles en la atmósfera vuelve a estabilizarse. Esto supone una pérdida de información para los posteriores análisis, sin embargo, la escasa fiabilidad de estos meses desaconsejaba su inclusión.

Finalmente se aplicó una última depuración en las series de datos. Para garantizar la eliminación de los posibles errores espaciales que hubieran podido permanecer tras los procesos de georreferenciación y control de calidad posterior se aplicó un filtro de paso bajo de ventana 3 x 3 a las imágenes resultantes del filtrado temporal. Gutman e Ignatov (1995) señalan que el ruido y los errores en los compuestos originales, y los que no han resuelto las técnicas de pre-proceso se pueden reducir mediante un filtrado espa-

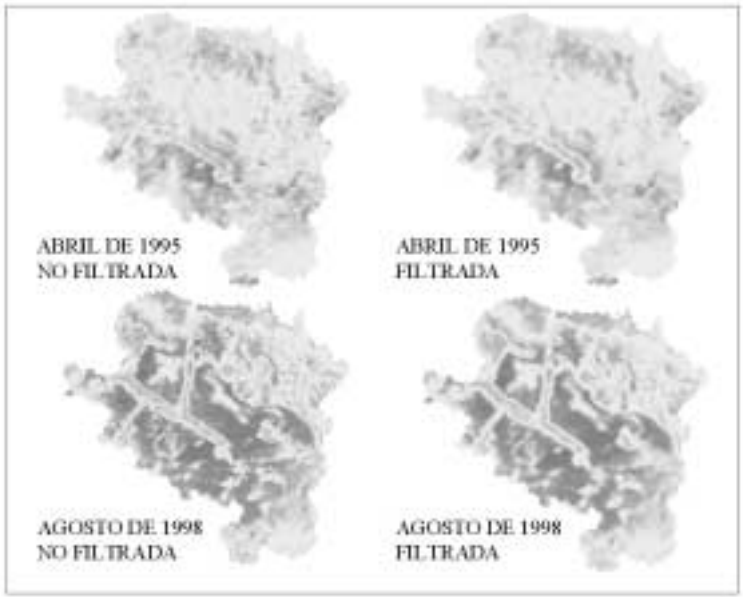
cial de 3 x 3 pixeles. Productos estándar como el GVI (*Global Vegetation Index*) son construidos mediante la aplicación de un filtro de 3 x 3 celdas para eliminar posibles errores residuales en la eliminación de nubes o, principalmente, en la georreferenciación (Gutman *et al.,* 1995). A pesar de ello, el proceso no está libre de inconvenientes, ya que el filtrado espacial degrada la resolución a la que disponemos las imágenes originales, de tal forma que la resolución espacial resultante no es de 1 km^2 sino la resultante del filtrado de paso bajo de ventana 3 x 3 km^2.

Parte de la variabilidad espacial podrá perderse como resultado del filtrado, de tal forma que el producto definitivo presentará una resolución menor, aunque más fiable en las comparaciones espaciales y temporales

En la figura 12 se muestra un ejemplo del proceso de filtrado espacial. Se aprecia la pérdida de detalles espaciales, y los márgenes entre cultivos de regadío, secanos o bosques se difuminan. Sin embargo, la estructura general de la imagen, así como la actividad vegetal de los usos dominantes permanecen visibles a la resolución resultante.

figura 12

EJEMPLOS DE FILTRADO ESPACIAL DE LOS COMPUESTOS MENSUALES DE NDVI.



Los procesos de creación de compuestos mensuales y el filtrado temporal y espacial limitan estudios de detalle en el tiempo y en el espacio. Sin embargo, garantizan en mayor medida la eliminación de los errores en las series de datos finales. El resultado final fueron 22974 series temporales de NDVI entre enero de 1987 y septiembre de 2000, correspondiendo, cada una de ellas a un píxel de 1 km^2 de superficie. Esto nos permite identificar los rasgos generales de la dinámica y la actividad vegetal durante un amplio periodo de tiempo (14 años) y con un elevado detalle espacial.

3.3. Fuentes de información para cuantificar las consecuencias de las sequías climáticas: utilización de datos agrícolas

Además de las series de imágenes de NDVI, también se ha utilizado otro tipo de información en el análisis de las consecuencias ambientales y agrarias de las sequías. Ésta consiste en los datos de producciones agrarias en algunos puntos de la geografía aragonesa, planteando un análisis a diferentes escalas espaciales. Se utilizaron los datos de una explotación, un municipio y agregados por comarcas agrarias.

Hay que tener en cuenta que las fuentes disponibles sobre productividad agraria en España resultan muy fragmentadas. El Ministerio de Agricultura dispone de estadísticas publicadas a escala nacional y regional, donde se registran los datos de productividad de los principales cultivos (p.ej., MAPA, 2000). Estos datos están agregados para todo el país o por comunidades autónomas, por lo que para el análisis del sector central del valle del Ebro estos registros no resultaban válidos.

Entre las fuentes más fiables para el análisis del impacto de las sequías sobre las producciones agrarias destacan los registros recogidos por parte de los propietarios de una explotación a lo largo del tiempo. En nuestro caso se ha podido disponer de una excelente fuente de información en forma de los registros históricos de una explotación en la comarca de los Monegros (concretamente en el municipio de Monegrillo), con datos continuos de productividad vegetal de trigo y cebada desde la década de 1940. Estos cultivos (trigo y cebada) representan el 27 % de la producción final agraria aragonesa (2001), luego su representatividad es incuestionable (Roldán *et al.,* 2002).

El sistema de cultivo de secano en esta explotación consiste en una rotación cultivo-barbecho. El sistema de cultivo comienza en enero o febrero, con un profundo arado de la tierra. En mayo o junio se produce la misma operación, pero con menor profundi-

dad. En septiembre u octubre se realiza una preparación del suelo antes de la siembra, que tiene lugar en octubre o inicios de noviembre, la floración se produce en la segunda mitad de abril y la cosecha entre el 10 y el 30 de junio (McAneney y Arrúe, 1993). Respecto al sistema de cultivo de esta explotación, hay que señalar que se han producido algunos cambios en las prácticas culturales. Desde la década de 1960 se han utilizado moderadas aportaciones de fertilizantes (nitratos y fosfatos).

La existencia de registros de este tipo es rara, siendo más común conservar los datos agregados por unidades administrativas mayores. En este sentido, también se ha contado con los datos de productividad agraria en el municipio de Tarazona, registrados y conservados por la cooperativa del campo San Atilano, con información de producción total de cultivos cerealísticos entre 1992 y 2000.

Finalmente, una última fuente de producción vegetal de contrastada calidad son los datos que conservan las entidades aseguradoras. En concreto, la Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA) lleva a cabo una estimación de las cosechas en cada una las explotaciones aseguradas, con una gran fiabilidad de las mismas de acuerdo a su potencialidad. Al final del ciclo productivo del cereal se realiza una estimación de la producción final, por lo que se pueden determinar las pérdidas totales que se han producido durante el año correspondiente. Estos datos recogen las producciones esperadas y las reales de cereal y leguminosas, y están agregados por comarcas agrarias. Se ha dispuesto de información entre las campañas de 1992-93 a 1997-98. El número de años es pequeño (6) pero contamos con la ventaja de disponer con tres años del primer quinquenio de la década de 1990, que fue muy seco, y otros tres de la segunda mitad de la década, que fue muy húmedo.

3.4. cálculo de los índices de sequía a partir de la información climática

Se han desarrollado numerosos métodos para el análisis de la intensidad, frecuencia, duración y extensión superficial de las sequías climáticas mediante la combinación de información espacial y temporal, ya que debido a las negativas consecuencias de las sequías es importante realizar una precisa cuantificación desde una perspectiva numérica y con amplio sentido geográfico. Una revisión general de estos indicadores puede consultarse en WMO (1975) o Heim (2000 y 2002).

El principal índice de sequía, y más ampliamente utilizado durante las décadas de 1970, 1980 y 1990 ha sido el índice de Palmer (PDSI, Palmer, 1965), muy utilizado en EE.UU. (Yin, 1993; Karl y Koscielny, 1982; Karl, 1983; McGregor, 1987; Eder *et al.,* 1987), aunque también en otras regiones como Canadá (Nkemdirim y Weber, 1999), Grecia (Dalezios *et al.,* 1991) o Argentina (Scian y Donnari, 1997). En Europa, Briffa *et al.* (1994) utilizaron el PDSI para analizar la evolución de la humedad estival, entre 1892 y 1991, en todo el continente.

El índice de Palmer es un tipo mixto basado en balances hídricos, pero que tiene también en cuenta las anomalías que se producen dentro de las variables que se introducen en el sistema (precipitación y ETP fundamentalmente) en relación al total de registros de las series. El índice de Palmer se basa en los principios de balance entre la provisión y la demanda de agua. Es un balance hídrico que considera entradas y salidas de agua en el suelo en forma de precipitación y ETP, y tiene en cuenta también la reserva de agua del suelo. Los cambios inducidos por el hombre (incremento de irrigación) no son tenidos en cuenta, por lo que el PDSI no deja de ser un índice se sequía climático (Karl, 1986).

El PDSI ha sido muy criticado debido a sus innumerables deficiencias (Alley, 1984). Karl (1986) señala que el PDSI está muy influido por el periodo seleccionado para la calibración de los datos y es seriamente alterado al establecer cambios en el periodo de calibración. Debido a todas sus desventajas, se han desarrollado otros indicadores como el *Rainfall Anomaly Index* (Van Rooy, 1965), el Bhalme&Mooley index (Bhalme y Mooley, 1980) o el *Standardized Anomaly Index* (Katz y Glantz, 1986), pero entre todo ellos sobresale el *Standardized Precipitation Index* (SPI) en cuanto a concepción teórica, robustez y versatilidad en el análisis de las sequías.

El *Standarized Precipitation Index* (SPI) fue desarrollado por McKee *et al.* (1993 y 1995) para conseguir una adecuada identificación de los periodos anormalmente secos y húmedos de forma más precisa que el índice de Palmer, ya que este último presenta una serie de limitaciones importantes. Guttman (1998) comparó las características espectrales del PDSI y el SPI, y recomienda utilizar el SPI como índice de sequía, debido a su mayor simplicidad y a que es estadísticamente invariante. El PDSI es más complejo, difícil de interpretar y tiene una escala temporal fija entre 9 y 12 meses; además, Guttman (1998) señala que es un índice con "memoria" que podría ser de más de 4 años. Mientras el PDSI se comporta como un proceso autorregresivo (que caracteriza un índice con memoria), el SPI se comporta como un proceso de media móvil, lo que supone

una mayor robustez para la realización de comparaciones espaciales (Guttman, 1998). El SPI es válido para todas las estaciones del año y los factores topográficos no influyen en los resultados, al contrario de lo que ocurre con el PDSI (Lana *et al.,* 2001). Keyantash y Dracup (2002) han testado la bondad de 18 índices de sequía, señalando que el SPI es el mejor índice climático para la estimación de la severidad, duración y extensión superficial de las sequías.

En general, los trabajos desarrollados hasta el momento muestran las ventajas que presenta el SPI en el reconocimiento de los periodos secos (Guttman, 1999; Hayes *et al.,* 1999). Numerosos organismos públicos norteamericanos están llevando a cabo un seguimiento de las sequías con fines preventivos mediante el uso del SPI (NDMC, 2003; C.C. Col., 2002; WRCC, 2002), lo que apoya la utilización del índice. McKee *et al.* (2002) señalan que el SPI es el más robusto y simple indicador para determinar los patrones espacio-temporales de las sequías. Las ventajas son múltiples, ya que se puede computar a diferentes escalas temporales, es muy adecuado para el seguimiento espacial de las sequías en tiempo real y determina la intensidad con la que la sequía está teniendo lugar. Además, el SPI permite determinar el inicio y final de las sequías.

Por estas sólidas razones se ha seleccionado el SPI como índice para el análisis de las sequías climáticas en el sector central del valle del Ebro. De hecho, se trata de un indicador que permite identificar, a la vez, sequías agrícolas o hidrológicas, además de una perfecta comparación espacial y temporal. Existen diferentes trabajos que analizan la utilidad del SPI en el seguimiento de las sequías (Edwards y McKee, 1997; McKee *et al.,* 2002; Hayes *et al.,* 1999; Wu *et al,* 2001; Dupigny-Giroux, 1999). Todos ellos ponen de manifiesto la enorme utilidad que supone la existencia de un índice como el SPI, ya que además de partir de una normalización real de las series de precipitación, permite un seguimiento continuo a diferentes escalas temporales.

La fuente de información básica para obtener el SPI debe ser una serie homogénea de precipitaciones mensuales de al menos 30 años de duración (Wu *et al.,* 2001). El hecho de que la serie presente un control de calidad previo y que los datos hayan sido homogeneizados se justifica porque los valores posteriores del índice serán tan buenos como lo sean los datos de partida; malos datos producirán malos índices. Guttman (1999) señala la necesidad de disponer de, al menos, 50 años de registros, ya que con ello se garantizará una adecuada representación estadística de los valores de las series, reconociéndose un mayor número de extremos. En este trabajo se ha seguido este criterio más restrictivo, con el fin de garantizar una mayor validez de los resultados a pesar

de perder cobertura espacial, ya que se dispone de un menor número de estaciones que cumplan con estos requerimientos mínimos de cobertura temporal.

Una de las principales características de las sequías es el cambio en su frecuencia a diferentes escalas temporales de análisis (Komuscu, 1999); y una de las ventajas del SPI es que permite identificar los periodos secos y húmedos con un amplio espectro de escalas temporales que van desde 1 a 72 meses (Edwards y McKee, 1997). A escalas temporales largas los periodos secos son menos frecuentes pero más duraderos. A escalas temporales cortas (3 meses) la frecuencia de estos periodos se incrementa, pero su duración desciende. El SPI responde rápidamente en cortas escalas a un mes muy seco o muy húmedo, lo que significa que cada nuevo mes tiene una larga influencia en el periodo en el que se suma la precipitación. No obstante, cuando la escala temporal se incrementa el índice responde lentamente, indicado pocos fenómenos de sequía pero de larga duración. En este trabajo se ha optado por un análisis a las escalas de 3, 6, 12 y 24 meses (Edwards, 2001). Las diferentes escalas de tiempo revisten un gran interés según la finalidad y objetivos de análisis. La humedad que contiene el suelo será muy sensible a periodos secos cortos (escalas de tres meses o menos; Szalai *et al.,* 2000; Sims *et al.,* 2002); frente a ello, el análisis de los recursos hídricos disponibles en una región concreta serán analizados mejor a partir de escalas temporales largas. Marcos (2001) señala que la sequía agrícola suele producirse poco tiempo después de la climática. En cambio, las sequías hidrológicas pueden producirse meses después del inicio de la sequía climática. La secuencia temporal sería: sequía meteorológica, agrícola y finalmente hidrológica.

En general, el procedimiento para obtener el SPI se basa en el ajuste de los registros mensuales a una distribución de probabilidad concreta para determinar, a partir de ella, la probabilidad acumulada de cada valor de precipitación registrado. Las probabilidades acumuladas son posteriormente transformadas en una variable normal estándar con media 0 y desviación estándar 1, lo que en realidad constituye el SPI. En este trabajo se ha utilizado un método de cálculo basado en la distribución Pearson III, que se ha comprobado más robusta para los cálculos (Guttman, 1999), y el método de L-momentos. El proceso completo de cálculo puede consultarse en Vicente-Serrano y Cuadrat (2002) y en Vicente-Serrano (2005).

El SPI representa el número de desviaciones estándar que los diferentes eventos quedan por encima o debajo de la media de un determinado observatorio. Edwards (2001) señala que el SPI es normalizado espacial y temporalmente, ya que cada una de las series ha sido homogeneizada previamente y puede analizarse a diferentes escalas

temporales dependiendo de los impactos que se pretendan analizar. Teóricamente, el SPI no presenta límites para sus valores (Guttman, 1999), sin embargo, límites de ±2.33 pueden ser admitidos, ya que corresponden a probabilidades de 0.99 y 0.01, y periodos de retorno de 1 en 100 años.

De acuerdo a los valores de SPI se puede realizar una clasificación que es de enorme utilidad para determinar la intensidad y duración de los periodos secos a distintas escalas temporales. Agnew (2000) propuso una clasificación muy robusta basada en los valores de probabilidad correspondientes al SPI (Tabla 2).

tabla 2

CLASIFICACIÓN DE LOS VALORES DEL SPI SEGÚN AGNEW (2000)

SPI	CATEGORÍA
>1.65	Extremadamente húmedo
1.28 a 1.64	Muy húmedo
0.84 a 1.27	Moderadamente húmedo
-0.84 a 0.84	Normal
-1.28 a –0.83	Moderadamente seco
-1.65 a –1.27	Muy seco
<-1.65	Extremadamente seco

3.5. Metodología para determinar el impacto de las sequías sobre la dinámica vegetal: integración de índices de vegetación, información geográfica y climática en un sistema de información geográfica

La posibilidad de disponer de una amplia información espacial continua y evolutiva de la actividad vegetal en el sector central del valle del Ebro permite realizar análisis detallados en el tiempo y el espacio, pero para ello es necesario contar con las herramientas y los métodos adecuados. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en una potente herramienta que permite capturar, modelizar, analizar y cartografiar datos espaciales. Los análisis se realizan mediante bases de datos espaciales, lo que permite realizar comparaciones estadísticas y producir nuevas bases o resultados útiles para un amplio rango de aplicaciones. La integración de la información disponible en un SIG debe permitir su interrelación, tanto espacial como temporalmente.

Los datos procedentes de la teledetección, las coberturas digitales (suelos, geología, topografía), las mediciones puntuales (precipitación) o los resultados de la modelización, presentan atributos espaciales, lo que permite su integración en este tipo de entornos. Pero además, la posibilidad de integrar información temporal en un SIG supone una importante potencialidad para el análisis de la información (Peuquet, 1994).

Para el análisis de las interacciones existentes entre la dinámica vegetal computada mediante series de NDVI y las sequías climáticas en el sector central del valle del Ebro se ha seguido un planteamiento similar al de Ji y Peters (2003), en el que se comparan temporalmente las curvas de NDVI y las de las condiciones de sequía en diferentes puntos del espacio, comprobando la diferente asociación espacial que se puede registrar en función de diferentes parámetros climáticos y de los diferentes usos del suelo. Sin embargo, estos autores trabajan con ambas variables agregadas a una escala espacial administrativa, es decir, promedian los valores de NDVI de los diferentes pixeles ubicados en un determinado marco administrativo, y los comparan con los índices climáticos también agregados administrativamente. Esta aproximación supone una cierta pérdida de información, eliminando totalmente la diversidad espacial existente y limitando los análisis e interrelaciones con otros tipos de información (usos del suelo, distribución espacial de las variables climáticas). La ventaja que plantea esta aproximación es la posibilidad de relacionar estos valores con los índices de sequía obtenidos mediante mediciones puntuales en observatorios meteorológicos concretos, y poderlos referir a áreas más amplias, ya que de lo contrario el análisis quedaría restringido a los puntos en los que se ubica el observatorio meteorológico.

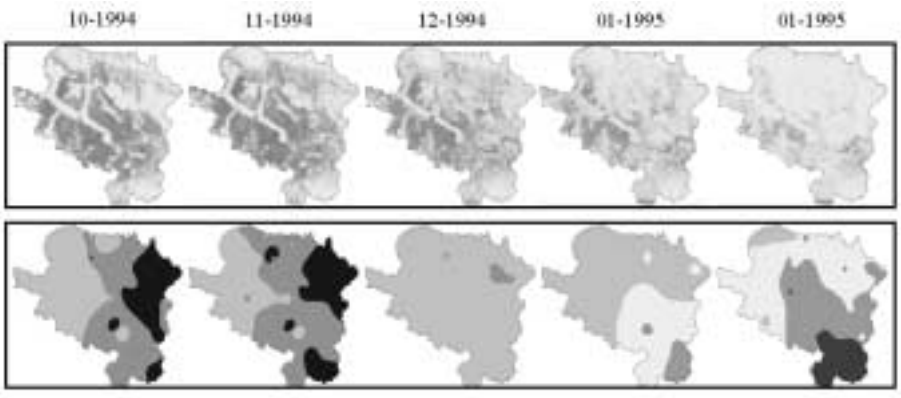
Por esta razón, resulta más adecuado el planteamiento utilizado por Wang *et al.* (2003) para el análisis de la influencia de las precipitaciones y temperaturas sobre la evolución del NDVI en las llanuras centrales de EE.UU. Estos autores no agregan los datos satelitales y climáticos a partir de unos límites administrativos concretos, ni restringen los análisis a puntos específicos del espacio, sino que realizan cartografías continuas de las variables climáticas a la misma resolución espacial que el NDVI. De esta forma se obtiene una serie temporal de las variables climáticas en cada píxel a partir de la que se realizan los análisis de correlación entre las series de NDVI y las de las variables climáticas. Ello reviste la ventaja de que, posteriormente, los análisis se pueden realizar píxel por píxel o considerando agregaciones (mediante el promedio) a partir de la litología, los usos del suelo o las formaciones vegetales principales.

Los fenómenos climáticos y meteorológicos son variables en el espacio y, por esta razón, los SIG presentan una solución muy útil para el manejo y gestión de amplias bases de datos climáticos para un amplio número de aplicaciones. Recientemente, Chapman y Thornes (2003) han realizado una revisión de la utilidad de estas herramientas con la finalidad de gestionar y analizar bases de datos climáticos con múltiples propósitos: climáticos, agrícolas, hidrológicos, etc. Los datos climáticos son, por naturaleza, puntuales, por lo que el aspecto clave será la extrapolación de la información a lo largo de un dominio espacial más amplio y continuo.

En las figuras 13 y 14 se muestra el fundamento de este tipo de integración espacio-temporal de la información en un SIG. En la figura 13 se muestran diferentes cartografías evolutivas de NDVI (arriba) y de los valores de SPI. Ambas informaciones son espacialmente continuas a un tamaño de píxel de 1 km^2, y tienen los mismos límites espaciales. En el primer caso la información se ha obtenido a partir de imágenes NOAA-AVHRR, mientras que en el segundo mediante la interpolación de valores puntuales obtenidos en diferentes observatorios meteorológicos.

figura 13

CARTOGRAFÍAS CONTINUAS Y EVOLUTIVAS DE NDVI (SUPERIOR) DURANTE ALGUNOS MESES DE 1994. INFERIOR: CARTOGRAFÍA CONTÍNUA DE SEQUÍA



De esta forma se pueden obtener series temporales continuas de ambas variables (evolución vegetal y climática) en cada píxel y, además, introducir otros tipos de infor-

mación topográfica, litológica o vegetal (Figura 14) que podrán ser utilizadas complementariamente en los análisis.

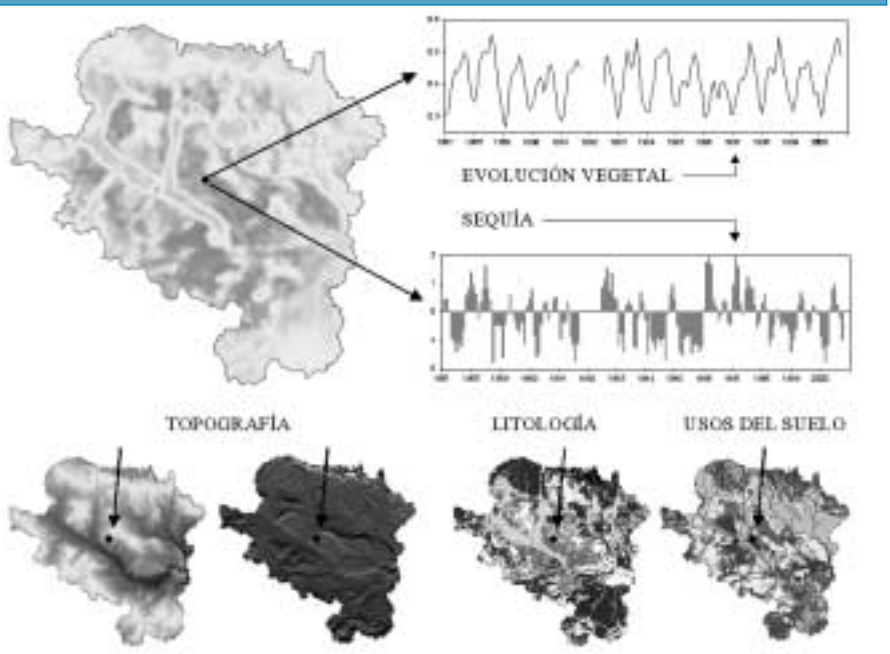
Esta información topográfica (elevación, pendiente, radiación solar incidente potencial,...), se ha elaborado mediante el SIG MiraMon (Pons, 1998), partiendo de un modelo digital de elevaciones a un tamaño de celda de 100 metros (CHE, 2003). La información litológica también se obtuvo en el mismo organismo. Mientras que la información sobre los usos y las cubiertas del suelo fue extraída de la base CORINE. Toda la información se integró en el SIG a la misma resolución espacial (1 km^2). En el caso de la información continua (topografía), la generalización se realizó mediante el promedio de los valores de la variable en los pixeles de 100 metros, mientras que en el caso de la información categórica (litología y usos del suelo) se realizó una selección por mayoría, asignando a cada uno de los pixeles de 1 km^2 el código de la cubierta con mayor superficie dentro del píxel.

Así pues, los análisis se realizaron mediante la integración espacio temporal de la información en un SIG: los índices de vegetación, la información geográfica y topográfica y la climática, tanto los valores medios como las series temporales climáticas (precipitaciones, temperaturas e índices de sequía) de cada estación. No obstante, para integrar la información climática con el resto de información espacial de forma continua es necesario proceder a su interpolación con el fin de disponer de datos en todos los puntos del espacio, independientemente de que exista una estación meteorológica o no. El procedimiento consiste en estimar, mediante métodos estadísticos, el valor de una variable climática en un punto concreto del espacio en el que no existe información, mediante los datos disponibles en diferentes estaciones meteorológicas.

Este hecho presenta una gran complejidad, y dado que los resultados posteriores dependerán, en buena medida, de la calidad final de las coberturas climáticas continuas (precipitaciones, temperaturas, índices de sequía) con que se trabaje, se han testado diferentes técnicas de interpolación espacial con el fin de minimizar los errores.

figura 14

INFORMACIÓN TEMPORAL DISPONIBLE EN UN PUNTO CONCRETO DEL ESPACIO (1 KM²) Y QUE APARECE INTEGRADA DENTRO DEL ENTORNO SIG.



3.6. Espacialización de la información climática mediante sistemas de información geográfica

La disponibilidad de datos climáticos en el espacio es muy problemática debido a que la información se recoge en estaciones permanentes, pero en ocasiones muy dispersas, y en la mayor parte de las ocasiones la información climática no está disponible en aquellos lugares donde resulta necesaria. Para resolver este problema se han desarrollado diferentes métodos cuyo objetivo es la predicción de los valores climáticos en las áreas donde no se dispone de información. Estos métodos difieren tanto en su concepción como en su formulación matemática (Borrough y McDonnell, 1998). Los llamados métodos globales utilizan información externa (por ejemplo datos geográficos y topográficos) para producir mapas climáticos por medio de modelos empíricos de regresión simple o múltiple (por ejemplo, Edwards, 1972; Hargy, 1997; Agnew y Palutikof, 2000; Ninyerola *et al.,* 2000; Brown y Comrie, 2002).

Otros métodos, como los de interpolación local, únicamente utilizan los datos climáticos procedentes de las estaciones meteorológicas. La predicción de los datos climáticos en un punto determinado se realiza por medio de las estaciones meteorológicas más cercanas. Mediante la utilización de estos datos se formula una función matemática que es usada para predecir el valor de la variable climática en ese punto. El proceso es espacialmente continuo, y termina cuando los datos climáticos son predichos en todos los puntos del área de interés. Los interpoladores locales como los polígonos de Thiessen, la ponderación por el inverso de la distancia o las funciones continuas o *splines* han sido utilizados frecuentemente en la predicción y en la cartografía de variables climáticas (Thiessen 1911; Willmott *et al.* 1985; Hutchinson 1995; Willmott y Robeson 1995; Blenow y Persson 1998; New *et al.* 2000).

Actualmente, junto a los modelos de regresión, las técnicas más utilizadas en la cartografía de variables climáticas son las geoestadísticas (Cressie, 1990; Atkinson, 1997; Goovaerts, 1997), que analizan la correlación espacial entre los datos registrados en las estaciones meteorológicas disponibles. Este análisis permite obtener predicciones sin sesgo y en las que la varianza espacial resulta mínima (Curran y Atkinson, 1998). Diferentes trabajos han utilizado geoestadísticos para la interpolación de datos climáticos (por ejemplo, Dingman *et al.* 1988; Karnieli, 1990; Bigg, 1991; Phillips *et al.* 1992; Bacchi y Kottegoda 1995), con resultados muy variados.

Otros métodos combinan técnicas globales, locales y geoestadísticas (Prudhomme y Reed, 1999; Ninyerola *et al.,* 2000; Brown y Comrie, 2002). Estos métodos examinan las relaciones físicas entre los datos climáticos y diferentes variables geográficas y topográficas, además de la correlación espacial entre la información registrada en las estaciones meteorológicas.

En la cartografía de valores medios se ha comprobado que los modelos de regresión aportan mejores resultados (Agnew y Palutikof, 2000; Vicente-Serrano *et al.* 2003). No obstante, las temperaturas, pero sobre todo las precipitaciones, pueden tener un comportamiento espacial muy contrastado en meses consecutivos. Como consecuencia de los diferentes factores atmosféricos y de las direcciones dominantes de los flujos de viento resulta muy compleja la búsqueda de relaciones empíricas con determinadas variables geográficas o topográficas. Jeffrey *et al.* (2001) indicaron que la variabilidad espacial de las precipitaciones se incrementa cuando desciende el periodo de acumulación de las mismas, aspecto que dificulta la cartografía y la estimación de las variables. En este sentido, los trabajos que han abordado la construc-

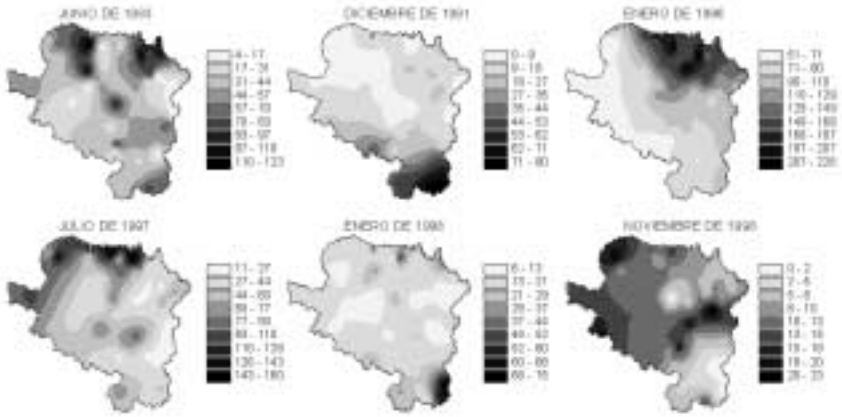
ción de series temporales de cartografías continuas han tenido que recurrir a métodos de interpolación local o geoestadística (Brown y Comrie, 2002; Jeffrey *et al.,* 2001; New *et al.,* 2000), debido al incremento de la variabilidad espacial y temporal cuando se dejan de considerar los valores medios.

Para la construcción de coberturas continuas de las variables climáticas en diferentes meses se testaron distintos métodos de interpolación en el sector central del valle del Ebro. En la realización de un test general se han utilizado los valores de precipitaciones en diferentes meses. Dentro de 103 observatorios se seleccionaron de forma aleatoria los registros pluviométricos de 6 meses entre 1980 y 2000, periodo en el que el número de observatorios meteorológicos resulta suficiente: junio de 1983, diciembre de 1991, enero de 1996, julio de 1997, enero de 1998 y noviembre de 1998. El número de observatorios utilizados en todos los casos ha sido de 70 para la realización de los modelos y de 33 para su validación. Se aplicaron los cinco métodos más generales, que han mostrado buenos resultados en la cartografía de los promedios anuales (Vicente-Serrano *et al.* 2003): inverso de la distancia (r = 2), *splines* con tensión (φ = 400), kriging ordinario, modelo de regresión a partir de variables independientes y método mixto que incluye la interpolación de los residuos obtenidos del modelo anterior. Una completa revisión de los diferentes métodos de interpolación utilizados, las técnicas de validación de las cartografías y las variables independientes utilizadas para los modelos de regresión puede consultarse en Vicente-Serrano *et al.* (2003).

En la figura 15 se muestran las cartografías de los diferentes meses obtenidas mediante el método de *splines* con tensión, donde se comprueba como los patrones espaciales varían muy claramente respecto a la distribución media de precipitaciones en el sector central del valle del Ebro. Existe una gran heterogeneidad espacial y se pueden llegar a registrar valores muy diferenciados entre puntos cercanos del espacio. Esta irregularidad se traduce en una mayor dificultad para obtener modelos de dependencia a partir de los que generar cartografías mediante diferentes variables independientes. Son llamativas las diferencias espaciales y de magnitud que se pueden llegar a producir en un mismo mes entre años diferentes. Es el caso, por ejemplo, del mes de enero en los años 1996 y 1998; en el primer caso con abundantes precipitaciones en todo el área de estudio, fundamentalmente en el sector más septentrional, mientras que en enero de 1998 fueron más escasas y se registraron con mayor cuantía en el sector sudoriental.

figura 15

EJEMPLOS DE CARTOGRAFÍAS DE PRECIPITACIONES EN MESES CONCRETOS.



La dificultad de construir modelos robustos queda patente en la tabla 3, donde se muestra el resultado de los modelos de regresión obtenidos. Exceptuando diciembre de 1991 y enero de 1996, meses en los que se obtiene un porcentaje adecuado de explicación de la varianza, en el resto de meses se obtienen modelos deficientes que apenas explican un 50 % de la variabilidad espacial de la precipitación. Este aspecto es indicativo del peso fundamental que tendrán los factores atmosféricos en la distribución espacial de las precipitaciones de meses concretos, pudiendo hablar más de aspectos meteorológicos que climáticos.

La validación de las diferentes cartografías realizadas mediante las estaciones pluviométricas reservadas para el test se muestra en la tabla 4. Únicamente se han calculado los estadísticos de error más generales y robustos (Ver Vicente-Serrano *et al.,* 2003: R^2, RMSE, MAE y D). En junio de 1983 los mejores resultados son obtenidos por los métodos de inverso de la distancia y kriging ordinario, mientras que la cartografía obtenida por regresión presenta errores apreciables. En diciembre de 1991, los errores medios son inferiores, y aunque se constatan menores diferencias entre los distintos modelos, la cartografía obtenida por el método de regresión reporta los peores resultados.

tabla 3

RESULTADO DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN REALIZADOS PARA LA INTERPOLACIÓN DE LOS MESES SELECCIONADOS.

Meses	R	R^2
jun-83	0.38	0.14
dic-91	0.91	0.82
ene-96	0.86	0.74
jul-97	0.68	0.46
ene-98	0.65	0.42
dic-98	0.57	0.32

Enero de 1996 es la única excepción en la que los métodos basados en técnicas de regresión aportan resultados superiores (D = 0.9) al resto (valores de D entre 0.85 y 0.87), aunque los errores medios, debido a la enorme magnitud de las precipitaciones que se registraron durante ese mes, fueron más altos que en otros meses. En julio de 1997 las diferencias son patentes entre los distintos modelos, de nuevo con peores resultados en el modelo de regresión basado en variables independientes (p. ej. RMSE = 27.2, frente a 22.3 en el caso del inverso de la distancia), y lo mismo sucede en enero y noviembre de 1998, meses en los que el valor de D es más de 0.1 unidades inferior en el modelo obtenido mediante técnicas de regresión que en los obtenidos mediante el resto de técnicas.

Comprobamos, pues, que a pesar de los excelentes resultados que plantea la cartografía de los valores medios mediante modelos de regresión (Vicente-Serrano *et al.,* 2003), para la creación de superficies continuas en meses concretos muestra múltiples limitaciones. Aunque la inclusión del proceso de interpolación de residuales mejora considerablemente las predicciones, los resultados no son significativamente mejores a los que ofrecen los métodos más sencillos de interpolación local o geoestadística. De hecho, si calculáramos el valor medio del único estadístico comparable entre las cartografías (D), comprobamos que el valor más alto se obtiene mediante los modelos de *splines* (0.80), superior al inverso de la distancia y a los modelos de regresión corregidos mediante residuales (0.798), al kriging ordinario (0.792), y muy superior a los modelos de regresión (0.711), que quedarían descartados para este tipo de estimaciones. Aunque Brown y Comrie (2002) proponen utilizar métodos mixtos para construir este tipo de series cartográficas, hemos comprobado, a partir del test realizado, que no existen diferencias ni estadísticas ni visuales lo suficientemente significativas como para justificar su utilización,

tabla 4

ESTADÍSTICOS DE ERROR OBTENIDOS DE LAS CARTOGRAFÍAS MENSUALES SELECCIONADAS

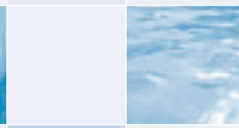
	R^2	MAE	RMSE	D
JUNIO DE 1983				
Inverso de la distancia	0.43	12.56	16.41	0.79
Splines	0.34	14.66	18.98	0.75
Kriging ordinario	0.44	11.95	15.92	0.76
Modelo de regresión	0.14	13.91	19.90	0.55
Modelo de regresión + residuales	0.34	14.78	19.02	0.75
DICIEMBRE DE 1991				
Inverso de la distancia	0.79	7.26	10.37	0.90
Splines	0.78	6.89	10.29	0.90
Kriging ordinario	0.74	7.00	10.3	0.90
Modelo de regresión	0.68	7.28	11.13	0.89
Modelo de regresión + residuales	0.74	6.99	10.08	0.91
ENERO DE 1996				
Inverso de la distancia	0.73	20.30	35.49	0.87
Splines	0.68	20.23	37.90	0.85
Kriging ordinario	0.69	19.25	36.44	0.87
Modelo de regresión	0.76	20.85	32.98	0.9
Modelo de regresión + residuales	0.76	17.53	32.81	0.9
JULIO DE 1997				
Inverso de la distancia	0.43	17.63	22.35	0.77
Splines	0.47	18.79	23.14	0.79
Kriging ordinario	0.38	18.07	22.68	0.74
Modelo de regresión	0.27	21.18	27.17	0.69
Modelo de regresión + residuales	0.35	23.78	29.42	0.71
ENERO DE 1998				
Inverso de la distancia	0.58	6.80	10.18	0.79
Splines	0.57	6.59	9.88	0.81
Kriging ordinario	0.57	6.97	10.19	0.79
Modelo de regresión	0.31	9.04	12.07	0.69
Modelo de regresión + residuales	0.58	6.65	9.41	0.84
NOVIEMBRE DE 1998				
Inverso de la distancia	0.40	3.60	5.65	0.67
Splines	0.44	3.51	5.51	0.70
Kriging ordinario	0.55	3.33	5.32	0.69
Modelo de regresión	0.27	4.05	6.27	0.55
Modelo de regresión + residuales	0.40	3.59	5.67	0.68

más aún cuando resultan mucho más costosos en tiempo, complejidad y en información necesaria.

Así pues, los modelos continuos temporales de cada una de las variables climáticas se han realizado mediante métodos estadísticos locales (*splines* con tensión, Mitasova y Mitas, 1992), que son menos costosos en tiempo e información, no precisan de complejos cómputos de semivariogramas o de estimación de modelos empíricos, e incluso ofrecen mejores resultados que métodos más complejos para la creación de cartografías continuas desde una perspectiva evolutiva.

Dolph y Marks (1992) utilizaron el método del inverso de la distancia para la creación de cartografías continuas de precipitación en la totalidad de EE.UU. y su inclusión en modelos de balance hídrico, comprobando la existencia de buenos resultados a pesar de la diversidad geográfica y topográfica de esta región. Jeffrey *et al.* (2001) van más allá y desarrollan una interpolación diaria de variables climáticas en Australia utilizando para ello *splines* regularizadas, al igual que Fleming *et al.* (2000) en Alaska. En realidad estos trabajos muestran los buenos resultados de este tipo de métodos para la espacialización de variables continuas medidas puntualmente como son las climáticas. Se asume que existen errores en los datos, pero que éstos van a resultar de forma aleatoria en las diferentes cartografías, y no de forma recurrente en los mismos puntos.

patrones espaciales y dinámica de la vegetación a partir de las series de NDVI



4. Patrones espaciales y dinámica de la vegetación a partir de las series de NDVI

El NDVI depende de una serie de variables intrínsecas a los ecosistemas y, también, de un serie de características geográficas. Di et al. (1994) señalan que la evolución temporal del NDVI está determinada por diferentes variables ambientales, y es función de una serie de factores climáticos (C: precipitación, temperatura e insolación), del tipo de vegetación y las características del ecosistema (V), de la topografía (P: elevación, pendiente y orientación), así como de las características del suelo (S: retención de humedad, cantidad de nutrientes, permeabilidad), y de los errores en el proceso (E).

$$NDVI = F(C,V,P,S)+E$$

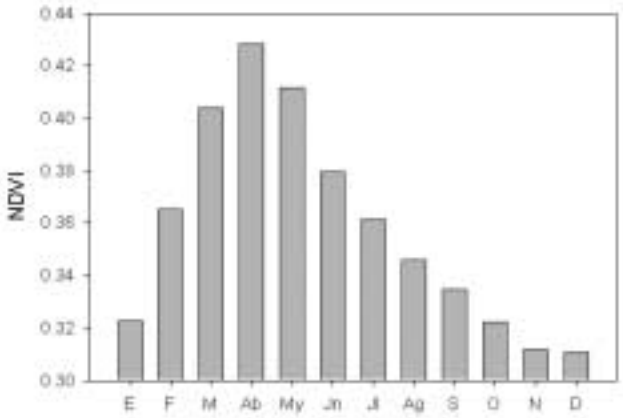
Las diferencias interanuales dependen, esencialmente, del factor C, pero las diferencias en el espacio no tendrán porqué tener una naturaleza climática, sino que pueden ser consecuencia de diferencias en el tipo de suelo, vegetación, características topográficas o incluso de los valores climáticos medios.

Por ello, para determinar el impacto de las sequías sobre la vegetación natural y los cultivos conviene analizar, previamente, las características de la vegetación y su dinámica, tanto desde una perspectiva intranual como interanual. Es necesario determinar las áreas que presentan, de forma natural, índices de vegetación más altos, así como las que tienen una baja actividad vegetal, que no necesariamente será indicativa de condiciones de sequía.

Una visión general sobre la actividad vegetal en el sector central del valle del Ebro se muestra a partir del análisis de los valores promedio mensuales en todos los píxeles del área de estudio (Figura 16). En esta figura se comprueba que los meses de menor actividad vegetal corresponden a las estaciones otoñal e invernal (octubre a enero), donde el NDVI promedio no supera un valor de 0.32. El incremento de la actividad vegetal entre febrero y marzo es muy significativo, y se prolonga hasta el mes de abril, momento que en el área de estudio se alcanza, en promedio, la máxima actividad vegetal (NDVI = 0.43). Desde abril hasta diciembre el descenso de los valores de NDVI es progresivo, aunque más lento que el incremento primaveral.

figura 16

PROMEDIO MENSUAL DE NDVI EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO.



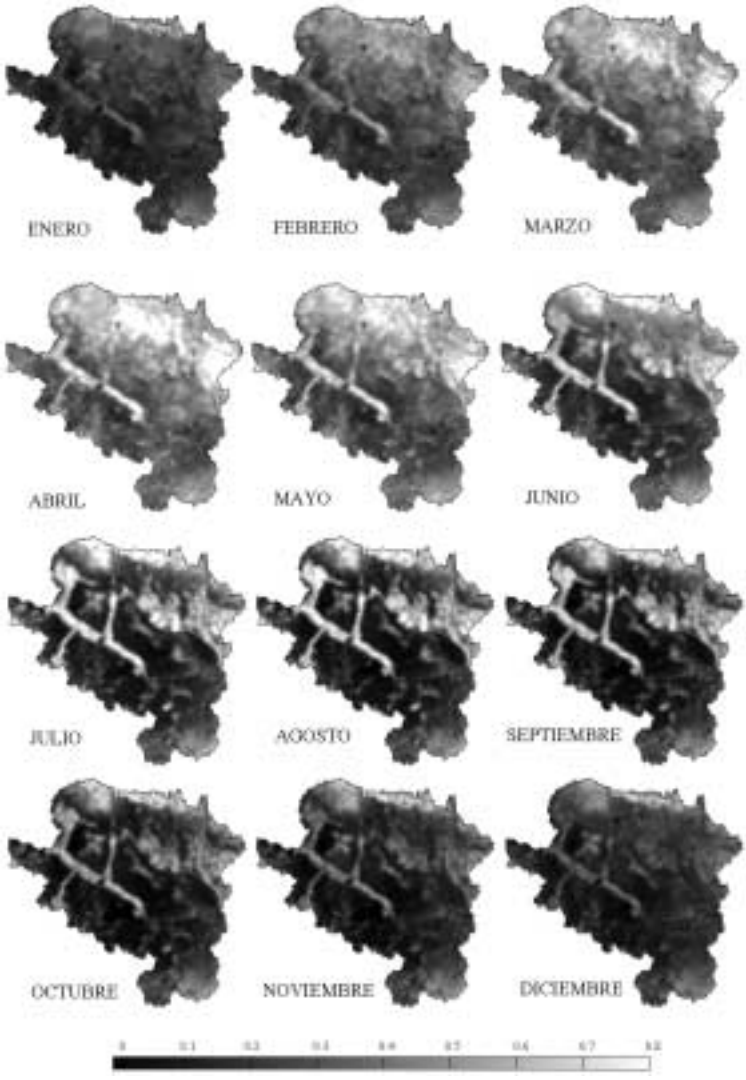
La figura 17 espacializa los valores promedio de NDVI en cada uno de los meses del año. En esta figura se observan los importantes contrastes espaciales y estacionales que tienen lugar en la actividad vegetal. Los meses con mayor actividad vegetal coinciden con los de la estación primaveral (marzo, abril y mayo), en los que un elevado porcentaje del área de estudio presenta valores de NDVI promedio por encima de 0.4. En el mes de junio, y como consecuencia del inicio de la estación seca, la actividad vegetal disminuye, siendo este aspecto más evidente durante los meses de julio a septiembre, en los que las amplias áreas de cultivos herbáceos de secano y los espacios ocupados por matorrales y pastizales presentan valores de NDVI inferiores a 0.2.

Durante los meses otoñales también predominan bajos valores de NDVI, así como durante el invierno. No obstante, durante los meses de enero y febrero se contempla un incremento notable de la actividad vegetal en amplias áreas; sobre todo durante el mes de febrero, que se podría considerar como un mes de transición entre las condiciones de baja actividad vegetal invernal debido al frío y los meses primaverales, con mayor actividad fotosintética. Ello se registra, sobre todo, en las áreas más septentrionales de cultivos de secano, y en algunas áreas de vegetación natural herbácea o arbustiva.

Durante los meses primaverales los contrastes espaciales son inferiores a los del periodo estival. En estos meses los valores más altos de NDVI se recogen en el sector más septentrional del área de estudio, coincidiendo con espacios de bosques, pastizales y

figura 17

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES MENSUALES PROMEDIO DE NDVI EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO (1987-2000).



matorrales (altas Cinco Villas), en los cultivos de secano de la Hoya de Huesca y en algunas áreas boscosas del Cinca medio. Estas áreas alcanzan su mayor vigor vegetal durante el mes de abril. Se puede comprobar que los valores de NDVI difieren considerable-

mente respecto a las áreas de matorrales y pastizales del centro del valle, en los que la escasa cubierta vegetal se manifiesta, de forma patente, en bajos valores de NDVI.

En el mes de junio los contrastes espaciales son muy significativos. El NDVI desciende acusadamente en las áreas de secanos de la Hoya de Huesca, así como en los matorrales y pastizales de las altas Cinco Villas. En la mayor parte del sector central del valle (áreas de cultivos herbáceos de secano, además de matorrales y pastizales) los valores de NDVI son inferiores a 0.3. Sin embargo, la diversidad espacial es llamativa y está producida, fundamentalmente, por la diversidad geográfica que introducen las vegas de los ríos principales (Ebro, Jalón y Gállego), en cuyos fondos se asientan cultivos de regadío tradicionales; además de los polígonos de riego creados en Bardenas, Monegros o Cinca a lo largo del siglo XX. En este caso, la aportación de agua limita el estrés hídrico, y permite una importante actividad vegetal facilitada por las elevadas temperaturas. Durante los meses estivales también se registra una alta actividad vegetal en el sector más septentrional, coincidiendo con áreas de bosques de frondosas y bosques mixtos en las áreas prepirenaicas. En el sur (cuenca del Matarraña y sectores más meridionales del Bajo Aragón) también se reconoce una actividad vegetal superior a la de los espacios centrales del valle, motivada por el predominio boscoso en estas áreas (coníferas, encinas y quejigos). Al igual sucede en algunos espacios del centro del valle (Sierra de Alcubierre, Montes de Zuera), con valores de NDVI superiores a 0.4 como consecuencia de la presencia de bosques de pinos (*Pinus halepensis* fundamentalmente) con los que se repoblaron estos espacios a partir de la década de 1950.

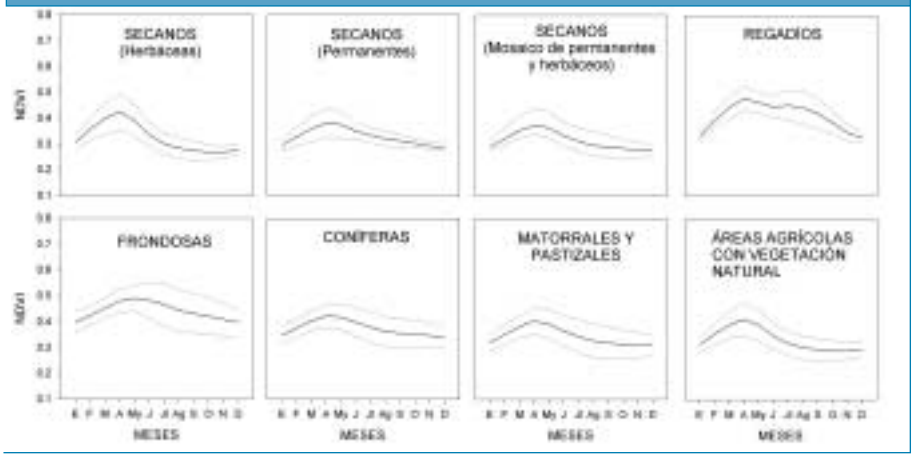
En los primeros meses otoñales (septiembre y octubre), la configuración espacial se mantiene, con unos patrones similares a los estivales, si bien, en el mes de octubre, y como consecuencia del descenso de las temperaturas, disminuye la actividad vegetal, y ya durante los meses de noviembre y diciembre se produce una homogeneización espacial de los valores de NDVI.

Como se ha comprobado, la actividad vegetal dentro del área de estudio es muy contrastada, y ello está condicionado por la diversidad de usos y cubiertas existentes. En la figura 18 se muestra la evolución anual promedio de los valores de NDVI en los principales usos del suelo del área de estudio. Se trata del promedio del total de píxeles que corresponden a cada cubierta, aspecto que no recoge la importante variabilidad espacial que se produce dentro de una misma cubierta, pero que permite determinar diferencias entre ellas.

Entre los rasgos más significativos se observa que las áreas de cultivos de secano (herbáceas), los espacios ocupados por matorrales y pastizales, y las áreas agrícolas con vegetación natural muestran un máximo de actividad vegetal entre los meses de abril y mayo. En estas cubiertas se produce un descenso acusado durante los meses de mayo y junio, manteniéndose con una escasa actividad durante los meses estivales, otoñales e invernales. El periodo de actividad vegetal es, pues, muy corto y el rango de variación a lo largo del año muy acusado. Los cultivos de secano permanentes (que en el área de estudio están representados, fundamentalmente, por viñedos y olivares), presentan también una alta actividad vegetal durante los meses primaverales, aunque con valores de NDVI inferiores a los de los cultivos herbáceos. Su actividad vegetal es más prolongada en el tiempo, manteniéndose durante los meses estivales y otoñales. Similar configuración presentan los bosques, tanto de frondosas como de coníferas, aunque los primeros indican valores superiores de NDVI. Finalmente, hay que señalar los cultivos de regadío que, además de presentar elevados valores de NDVI, mantienen la actividad vegetal durante la totalidad de meses estivales.

figura 18

PROMEDIO DE NDVI MENSUAL EN LOS USOS DEL SUELO MÁS REPRESENTATIVOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. LAS LÍNEAS GRISES INDICAN 1 DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR ENCIMA Y DEBAJO DE LA MEDIA DE CADA MES



Diferentes trabajos han mostrado que la cantidad de materia vegetal producida por los diferentes ecosistemas está muy correlacionada con los valores integrados de NDVI a lo largo del año.

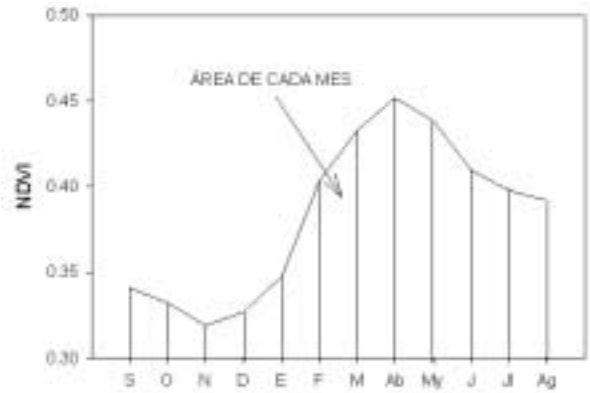
Las técnicas para determinar la producción vegetal primaria a partir de datos NOAA-AVHRR en espacios áridos y semiáridos se basan en la relación que se establece entre la biomasa vegetal y el NDVI o la suma temporal del NDVI (Wyllie *et al.,* 1991). Los índices de vegetación pueden compararse de forma temporal a lo largo de la etapa de crecimiento para observar diferencias relativas en la fenología vegetal; pero los índices también pueden plantearse como un resumen de los ciclos fenológicos: la integral de la curva que representan dichos ciclos produce un único número que se asocia a la acumulación total de materia orgánica (Tucker *et al.*, 1981). Tucker *et al.* (1983b) muestran una estrecha relación entre los valores de NDVI integrados a lo largo de la fase de actividad vegetal y la cantidad total de biomasa en las regiones semiáridas de África (R^2 = 0.75), aspecto también comprobado por otros autores (Tucker y Sellers, 1986; Prince y Tucker, 1986; Prince, 1991; Justice, 1986; Prince y Justice, 1991). Hay que tener en cuenta que la identificación de los ciclos vegetativos puede resultar compleja y encontrar notables diferencias entre cubiertas. Por esta razón, las estimaciones se han realizado, frecuentemente, a partir de la integración de los datos anuales. Tucker *et al.* (1985) llevaron a cabo una integración de los datos de NDVI a escala anual (a partir de ahora este valor anual integrado se denomina ΣNDVI) en el Sahel entre 1980 y 1984, y la compararon con los datos de biomasa vegetal medida en el campo, obteniendo buenas correlaciones (r > 0.65) entre ambas informaciones.

Entre los ejemplos más significativos de estos análisis destaca el estudio de Paruelo *et al.* (1997), que relacionaron los valores integrados anuales de NDVI con los de producción vegetal en 19 áreas de pastizales en Norteamérica durante 4 años, obteniendo una positiva y significativa relación (R^2 = 0.93). Running y Nemani (1988) obtuvieron un coeficiente de determinación de R^2 = 0.72 entre los datos integrados anuales de NDVI procedentes del satélite NOAA y la producción vegetal de diferentes ecosistemas, tanto matorrales, vegetación herbácea y bosques de diferente tipo en EE.UU. Diallo *et al.* (1991) comprobaron en Senegal y Gambia la existencia de una estrecha relación entre los valores de producción de biomasa vegetal medida en el campo y los valores del ΣNDVI integrado, obteniendo en la mayor parte de los años analizados valores de R^2 superiores a 0.6. Lo Seen Chong *et al.* (1993) analizaron la relación entre los valores de ΣNDVI y la producción de biomasa en el conjunto del continente africano, señalando que la estimación de la producción vegetal mediante este método es muy superior a la que se obtiene mediante modelos climáticos.

Los valores integrados de NDVI se han calculado siguiendo una aproximación trapezoidal (Justice e Hiernaux, 1986; Samson, 1993), ya que los datos disponibles son mensuales. En la figura 19 se muestra el proceso de cálculo del NDVI integrado anual (ΣNDVI). El cálculo integrado anual se obtiene mediante la suma del área (polígono) que encierra la curva de cada uno de los meses. Se ha trabajado con valores integrados anuales, considerando un criterio de años agrícolas (septiembre – agosto). Aunque existen usos y cubiertas cuya actividad vegetal llega hasta septiembre u octubre (fundamentalmente los cultivos de regadío), se consideró la utilización de años agrícolas para adaptar mejor la información a los ciclos de las áreas que más superficie ocupan dentro del valle, como son los cultivos de secano, pastizales y matorrales. El cálculo de estos valores puede permitir la cartografía de productividad vegetal anual a lo largo del tiempo.

figura 19

CÁLCULO DEL NDVI INTEGRADO ANUAL (ΣNDVI)



En la figura 20 se muestran los valores de ΣNDVI promedio en cada uno de los píxeles del área de estudio entre 1987 y 2000. Se contempla un amplio espacio en el sector central del valle del Ebro, donde los valores son bajos, lo que indica una escasa producción de biomasa vegetal a lo largo del año. La heterogeneidad espacial es muy elevada.

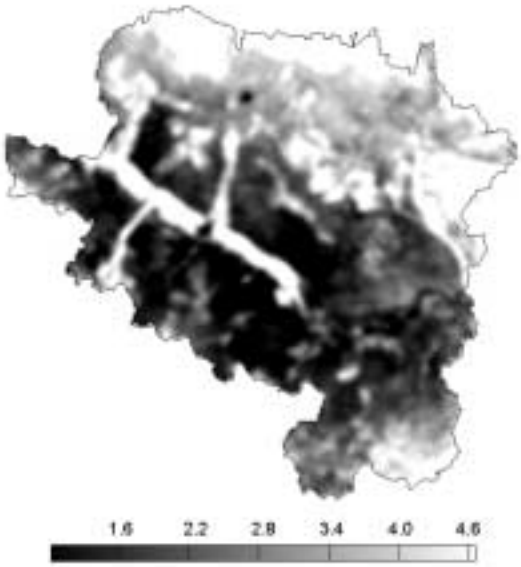
La mayor producción vegetal se registra en el norte del área de estudio, donde se concentran las principales áreas boscosas (coníferas, frondosas y bosques mixtos), aunque también aparecen algunos puntos aislados (siendo el ejemplo más llamativo el Moncayo)

donde la producción vegetal anual es muy elevada. En el sector central del valle destacan las áreas de regadío (ΣNDVI > 4.0), tanto las creadas en el siglo XX (Bardenas, Monegros y Cinca), como los regadíos tradicionales ubicados en las vegas de los ríos Ebro, Gállego y Jalón. Los bosques del sector meridional, así como los ubicados en la sierra de Alcubierre y los montes de Zuera, también presentan una alta producción vegetal a lo largo del año (ΣNDVI > 2.8), aunque inferior a los bosques del sector más septentrional. Igualmente, los campos de secano de la Hoya de Huesca indican valores integrados superiores a los del centro de la depresión.

Se produce, pues, un contraste significativo entre las áreas de mayor productividad vegetal (bosques y regadíos) y los cultivos de secano, matorrales y pastizales del centro de la depresión. El sustrato litológico (yesos en su mayor parte), la gran aridez que caracteriza estos espacios (escasas precipitaciones y un acusado estrés hídrico anual) y la escasa cubierta vegetal natural existente hacen que la actividad vegetal sea baja. En algunos sectores se registra una productividad muy escasa (en amplias áreas del campo de Belchite los valores de ΣNDVI son inferiores a 1 y en la mayor parte de los Monegros no llegan a 1.2).

figura 20

VALORES DE ΣNDVI PROMEDIO ANUAL EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO.



Así pues, se comprueba que la actividad vegetal en el sector central del valle del Ebro presenta una clara variabilidad espacial y temporal a lo largo del año. Por ello, y para una mejor comprensión de las características vegetales del área de estudio se han extraído los patrones espaciales generales del NDVI, y como éstos se comportan a lo largo del tiempo.

Entre las técnicas más utilizadas para extraer las características de distribución espacial de la vegetación a partir de imágenes de satélite hay que destacar el uso del Análisis de Componentes Principales (ACP). Tradicionalmente, en teledetección las técnicas de ACP son utilizadas en el dominio espectral con el propósito de comprimir los datos y resumirlos (Richards, 1993). En el dominio espacial se suele utilizar en la discriminación de usos del suelo y cubiertas vegetales (Townshend, 1984). Pero en el dominio temporal el ACP se utiliza habitualmente en teledetección para estudiar la variabilidad vegetal y los cambios de usos del suelo (Fung y LeDrew, 1987; Eastman y Fulk, 1993).

Algunos autores han aplicado el ACP para identificar los patrones generales de la actividad vegetal en diferentes ámbitos; por ejemplo, Anyamba y Eastman (1996) utilizaron ACP para determinar los patrones generales del comportamiento del NDVI en África, conocer su representatividad a lo largo del tiempo y determinar el papel de los patrones atmosféricos en su conformación. Igualmente, Townshend *et al.* (1985) analizaron mediante ACP las imágenes de NDVI mensuales de África y Norteamérica para identificar los patrones espaciales de los principales modos de variación temporal, comprobando diferentes comportamientos en función de las distintas cubiertas del suelo.

En el sector central del valle del Ebro se ha utilizado un análisis de componentes principales en modo T (Serrano et al., 2001). Para ello, cada una de las imágenes mensuales ha constituido una variable independiente en el análisis, mientras que los píxeles de 1 x 1 km (22974) constituyen los casos particulares. En el análisis se extrajeron 4 componentes que explican en su conjunto el 93.5 % de la varianza espacial del NDVI en los

tabla 5

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. MODO T. ROTACIÓN VARIMAX A PARTIR DE LAS SERIES DE NDVI EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO.

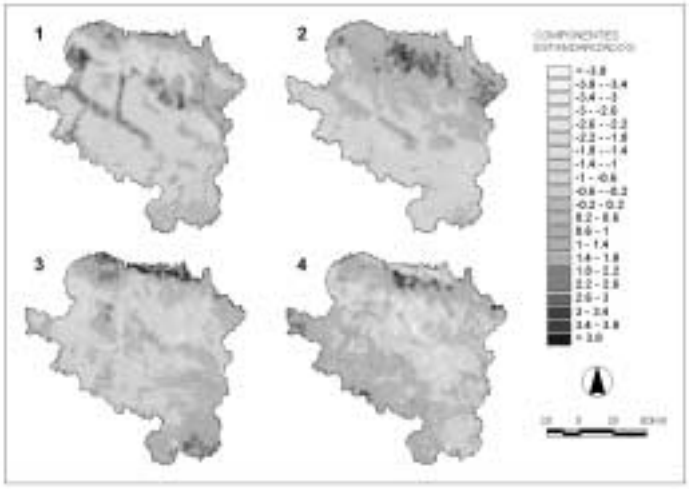
Componentes	Autovalor	% de la varianza	Varianza acumulada
1	69.71	44.69	44.69
2	50.84	32.59	77.28
3	23.57	15.11	92.39
4	1.69	1.07	93.46

14 años analizados. Los resultados se muestran en la tabla 5. Se optó por una rotación de la matriz de cargas factoriales (VARIMAX). Para la selección del número de componentes se siguió el criterio de autovalor > 1. Los tres primeros componentes explican el 92.4 % de la variabilidad espacial del NDVI en el sector central del valle del Ebro.

En la figura 21 se muestra la distribución espacial de los componentes. El primero permite identificar claramente las áreas de regadíos y los bosques más septentrionales, ambos espacios con valores positivos. Se produce un significativo contraste con las áreas de vegetación natural y los cultivos de secano que las circundan, que dominantemente presentan valores negativos.

figura 21

PATRONES ESPACIALES GENERALES EXTRAÍDOS DE LAS SERIES DE NDVI A PARTIR DE UN ACP (MODO T). ROTACIÓN VARIMAX.



Este primer componente sería el modo más significativo de distribución espacial de los valores de NDVI, es decir, la situación que aparece más habitualmente, que se corresponde, de forma general, con la imagen de valores promedio obtenida a partir del ΣNDVI. El componente 2, que también representa un elevado porcentaje de la variabilidad espacial (32.6 % de la varianza total), muestra valores altos en las áreas de cultivos de secano, matorrales y pastizales de la Hoya de Huesca, así como en algunas áreas de

regadíos del Ebro y del Cinca. El resto de las áreas indican valores negativos. Esto significa que esta configuración espacial es una situación muy habitual en la distribución espacial de la vegetación en el sector central del valle del Ebro, con altos valores de NDVI en la Hoya de Huesca y bajos en el resto de los espacios, además, con una escasa diferenciación en función de los usos o cubiertas del suelo existentes.

El componente 3, que también explica un porcentaje significativo de la varianza (15.1 %), indica valores positivos en las principales áreas de bosques de coníferas del valle (tanto en las altas Cinco Villas y el Prepirineo, puertos de Beceite, como en las masas repobladas del centro del valle, en los montes de Zuera y en la sierra de Alcubierre). Finalmente, el componente 4 señala valores positivos en algunas áreas concretas de bosques de frondosas, tanto en el límite prepirenaico, como en el Somontano de la Cordillera Ibérica, aunque la frecuencia con que aparece este patrón espacial es muy inferior (únicamente representa el 1.5 % de la varianza temporal).

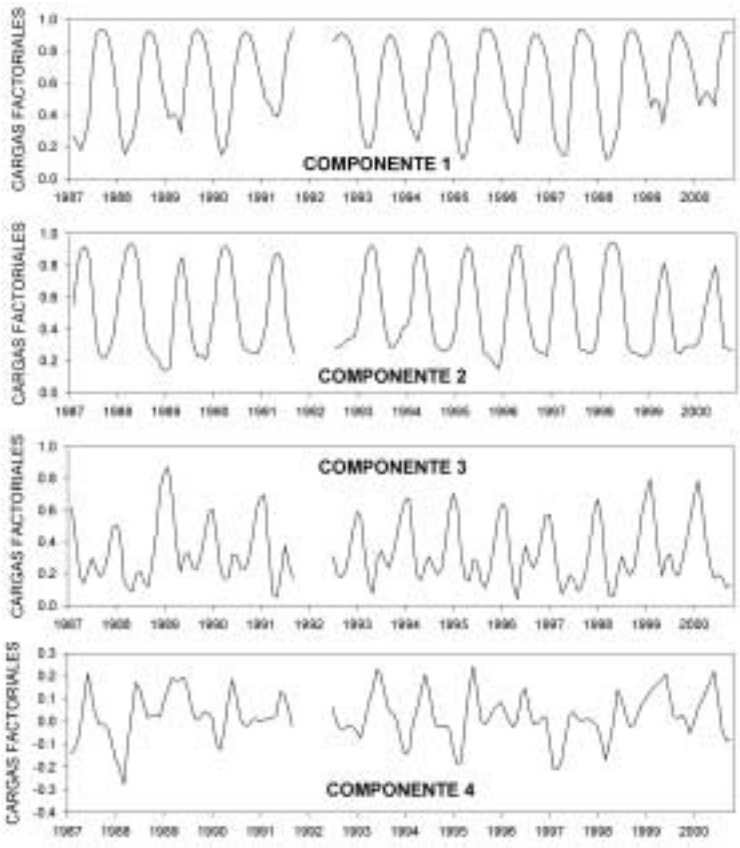
La evolución temporal de estos patrones queda registrada a partir de la matriz de cargas factoriales (correlación entre cada una de las cartografías de NDVI mensual y cada uno de los componentes). La figura 22 muestra la evolución de las cargas factoriales correspondientes a cada uno de los componentes.

El componente 1 (altos valores de vegetación en los cultivos de regadío y bosques prepirenaicos) muestra la diferenciación espacial del NDVI durante los meses estivales. La correlación entre la distribución espacial de los componentes estandarizados y la distribución espacial del NDVI durante estos meses es muy elevada ($r > 0.9$). Se producen escasas diferencias interanuales, por lo que se puede afirmar que la distribución espacial de la actividad vegetal durante los meses de verano muestra patrones similares cada año. La disponibilidad de agua en estos sectores, por los aportes de agua en los regadíos, y por las mayores precipitaciones y superior acumulación de agua en el suelo en las áreas montañosas de vegetación natural facilita el desarrollo vegetal, mientras que el periodo seco estival reduce la actividad en el resto de los espacios.

Durante los meses invernales y primaverales, la distribución espacial de la actividad vegetal tiene poco que ver con la espacialización del NDVI que representa el componente 1. En primavera, la distribución espacial de la actividad vegetal es más similar a la indicada por el componente 2 (mayor actividad vegetal en la Hoya de Huesca y en algunos sectores de regadíos). No obstante, el número de meses que

figura 22

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS CARGAS FACTORIALES CORRESPONDIENTES A CADA UNO DE LOS COMPONENTES EXTRAÍDOS.



aparece de forma perfectamente nítida este patrón es inferior al del componente 1, reduciéndose a los meses de marzo a mayo. En estos meses se produce la floración de los cereales y, por tanto, su máxima actividad en estos espacios (McAneney y Arrúe, 1993). En estos momentos las temperaturas son todavía frías y, de hecho, aún se pueden llegar a producir heladas tardías (Cuadrat, 1999), por lo que los cultivos de regadío no presentan una importante actividad ya que son más sensibles a estas condiciones (Martí, 1993), mientras que los cereales de secano muestran una mayor resistencia a estos eventos.

Hay que señalar que en los dos últimos años analizados (1999 y 2000), así como en el año 1989, se aprecia un descenso de la representatividad del componente 2, coincidiendo con una mayor correlación de las condiciones en primavera con la representación espacial del componente 1. Sin embargo, exceptuando estos dos últimos años, existe una baja variabilidad temporal, y en todos los años se identifica esta configuración espacial como la más característica de los meses primaverales.

El componente 3 presenta su máximo de representatividad durante los meses invernales, aunque en ningún caso las cargas factoriales llegan a los valores indicados por los componentes 1 y 2, por lo que la similitud entre las condiciones reales de diferenciación espacial y lo indicado por el componente 3 será inferior que en el caso de los dos primeros componentes. No obstante, se puede señalar que esta sería la situación general durante el invierno, momento en que únicamente los bosques de coníferas mantendrán una actividad vegetal superior y claramente diferenciable en el espacio.

El componente 4 indica valores bajos de correlación con la distribución espacial a lo largo del tiempo, por lo que es poco representativo de las condiciones reales de actividad vegetal. Además, su elevada irregularidad temporal impide establecer pautas de comportamiento explicables desde un punto de vista fenológico.

Así pues, se comprueba que la actividad vegetal en el área de estudio presenta una elevada diversificación espacial condicionada por la localización de los usos del suelo, los cuales, a su vez, muestran una elevada variabilidad estacional. La producción anual de biomasa vegetal de los diferentes ecosistemas es también diversificada, destacando los bajos valores del sector central del valle. Se ha mostrado claramente que existen diferencias debidas a condiciones naturales relacionadas con la estacionalidad o la distribución espacial de la vegetación, y que en ningún momento deben considerarse como anomalías espaciales o temporales asociadas a la influencia del clima o a la ocurrencia de sequías.

4.1. Factores geográficos que condicionan la distribución espacial del NDVI

Diferentes trabajos han comprobado que la latitud (Suzuki *et al.,* 2001; Lucht *et al.,* 2002), el tipo de suelo (Farrar *et al.,* 1994), el tipo de cubierta vegetal (Justice *et al.,* 1985), o la topografía (Florinsky y Kuryakova, 1996), condicionan determinantemente la actividad vegetal, lo que puede afectar a las relaciones que se producen entre el NDVI y

las condiciones climáticas. Por ello, antes de analizar la influencia del clima sobre la actividad vegetal es necesario conocer el papel de los factores geográficos sobre la distribución del NDVI, ya que la influencia final del clima, en general, y de las sequías, en particular, podrá quedar matizada por la influencia de estos factores.

En primer lugar, se ha analizado la posible existencia de diferencias significativas en la producción vegetal anual (a partir de los valores de ΣNDVI) con relación a una serie de factores estáticos (a la escala temporal de este análisis): desde la diversidad espacial de los diferentes tipos de uso del suelo hasta factores de carácter topográfico o litológico.

Para determinar si se producen diferencias significativas en los valores promedio de ΣNDVI, en función de los diferentes usos del suelo, se ha realizado un análisis de varianza, donde el factor de agrupación son los usos del suelo y la variable el valor promedio de ΣNDVI en cada píxel. Hay que tener en cuenta que existe un factor estructural en los ecosistemas, y este análisis puede permitir diferenciarlos en función de su productividad media.

En la tabla 6 se muestran los resultados de la ANOVA, en la que se indican diferencias significativas entre los valores de ΣNDVI en los diferentes usos del suelo.

tabla 6

TABLA ANOVA. COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DE ΣNDVI EN FUNCIÓN DE LOS DIFERENTES USOS DEL SUELO.

	Suma de cuadrados	Df	Media al cuadrado	F	p.
Entre grupos	4573.24	12	381.10	1014.06	<0.001
Intra grupos	8629.19	22961	0.37		
Total	13202.43	22973			

Para determinar los grupos de usos del suelo entre los que no existen diferencias significativas se utilizó el contraste de Bonferroni, que utiliza el test de la *t* de *Student* para comparar entre las medias de los diferentes grupos. Para ello se fijó un nivel de significación de $p < 0.05$.

En la figura 23 se muestran los valores medios y los niveles de confianza del ΣNDVI promedio correspondientes a los principales usos del suelo del área de estudio. Se comprueba que los bosques mixtos y bosques de frondosas muestran los valores más elevados de ΣNDVI. Entre ambos no existen diferencias significativas ($p = 0.38$), pero sí con el resto de los usos del suelo. Los cultivos de regadío presentan un promedio de 3.05,

siendo el tercer uso del suelo con mayor productividad vegetal. Le siguen los bosques de coníferas y, ya a mucha distancia, las áreas de matorrales y pastizales y los cultivos de secano (herbáceos, permanentes y mosaico de herbáceos y permanentes, entre los cuales las diferencias son muy escasas). Los resultados son acordes con las cartografías mostradas, siendo significativo el importante contraste de producción vegetal que tiene lugar entre los cultivos de secano y regadío, aspecto indicativo de las limitaciones productivas que supone la falta de agua.

Las diferencias de producción pueden estar motivadas por otros factores. La topografía ejerce una importante influencia en la distribución espacial de la cubierta vegetal (Vicente-Serrano *et al.,* 2003b). La elevación en las áreas de montaña limita la capacidad de producción de la vegetación a lo largo del año, debido a su estrecha relación con la temperatura (García-Ruiz *et al.,* 1985). Pero en espacios áridos o semiáridos como el sector central del valle del Ebro, las áreas de mayor elevación pueden presentar ventajas comparativas respecto al resto de los espacios, ya que las tasas de ETP son inferiores y, generalmente, las precipitaciones mayores. Además, otros factores topográficos condicionan la actividad y producción vegetal (Florinsky y Kuryakova, 1996). Las fuertes pendientes dificultan el crecimiento vegetal, mientras que las zonas de curvatura cóncava facilitan la acumulación de humedad y nutrientes en el suelo. Finalmente, la radiación solar que recibe cada espacio podrá condicionar de forma importante el desarrollo vegetal. En condiciones adecuadas de humedad, altos valores de radiación suponen un mayor potencial para los procesos fotosintéticos y para el intercambio de flujos radiativos entre la planta y la atmósfera (Allen *et al.,* 1998). Sin embargo, en situaciones de estrés hídrico, una mayor radiación solar dará lugar a un empeoramiento de dicha situación.

Para determinar la influencia que ejerce la topografía sobre la actividad y producción en el área de estudio se ha realizado un análisis de correlación entre los valores de NDVI anual en cada píxel, y los valores de las variables topográficas: elevación, curvatura, pendiente y radiación solar incidente. El análisis se ha realizado en la totalidad del área de estudio, pero también para los usos del suelo principales (Tabla 7).

En el conjunto del área de estudio los valores de ΣNDVI promedio muestran correlaciones positivas y significativas con la elevación, pendiente y radiación solar incidente. La correlación con la curvatura no es significativa. Sin embargo, considerando usos del suelo particulares se observan diferencias importantes. En el caso de

figura 23

VALORES MEDIOS Y NIVELES DE CONFIANZA DEL ΣNDVI PROMEDIO EN LOS PRINCIPALES USOS DEL SUELO. LOS CÓDIGOS DE USOS DEL SUELO REPRESENTAN: 2- CULTIVOS DE SECANO (HERBÁCEOS), 3- CULTIVOS DE SECANO (PERMANENTES), 4- CULTIVOS DE SECANO (MOSAICO DE HERBÁCEOS Y PERMANENTES), 5- CULTIVOS DE REGADÍO, 6- BOSQUES DE FRONDOSAS, 7- BOSQUES DE CONÍFERAS, 8- BOSQUES MIXTOS, 9- MATORRALES Y PASTIZALES, 10- ÁREAS AGRÍCOLAS CON VEGETACIÓN NATURAL.

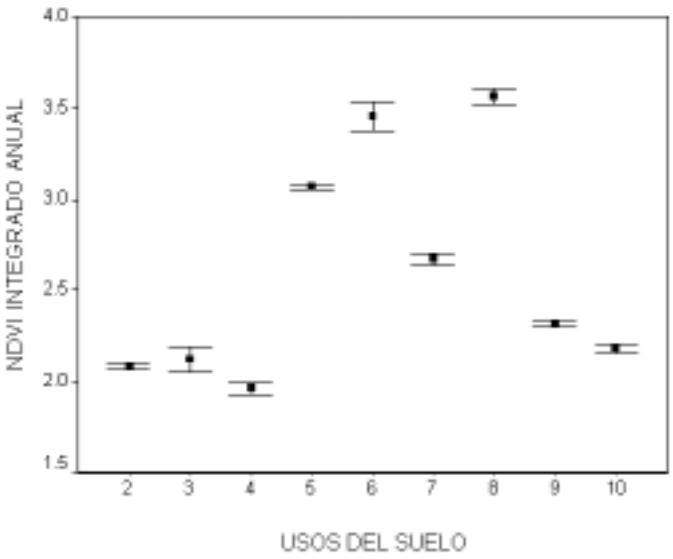


tabla 7

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y DIFERENTES VARIABLES TOPOGRÁFICAS. RESULTADOS PARA EL TOTAL DEL ÁREA DE ESTUDIO Y PARA LAS ÁREAS OCUPADAS POR DIFERENTES USOS DEL SUELO. LAS CATEGORÍAS DE USOS DEL SUELO COINCIDEN CON LAS DESCRITAS EN LA FIGURA 23. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.01), * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.05).

		USOS DEL SUELO									
	Total	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Elevación	0.35**	0.30**	-0.18*	0.23**	-0.31**	0.77**	0.65**	0.69**	0.57**	0.56**	0.48**
Radiación	0.15**	0.23**	0.34**	0.32**	0.04	0.11*	0.13**	0.28**	0.25**	0.29**	0.41**
Pendiente	0.27**	0.12**	-0.11	0.27**	-0.26**	0.59**	0.33**	0.48**	0.47**	0.25**	0.36**
Curvatura	-0.01	0.01	-0.18*	-0.02	-0.10**	-0.16**	0.07**	-0.12**	-0.04	0.09**	0.12

los cultivos herbáceos de secano (2) tiene lugar una mayor producción en aquellas áreas ubicadas a mayor elevación, presentando la radiación solar potencial una influencia también positiva. Los extensos cultivos de secano que aparecen en la Hoya de

Huesca reciben mayores precipitaciones medias que los ubicados en el centro del valle, debido a su mayor apertura a las perturbaciones oceánicas y a su mayor elevación, aspecto que explica esta directa relación entre los valores de ΣNDVI y los de elevación en los cultivos de secano.

Sin embargo, en el caso de los secanos permanentes (3), tanto la elevación como la pendiente muestran una relación negativa, de tal forma que aquellos cultivos más productivos se ubicarán, en general, en las áreas de menor elevación, presentando la radiación potencial un importante peso positivo. Las áreas de mosaico de estos dos tipos de uso (4) indican una mezcla de la influencia del relieve. En todos los casos la correlación es positiva, tal como sucede en los cultivos herbáceos de secano, pero el peso de la radiación potencial es superior al de las otras variables.

La influencia de las variables topográficas cambia considerablemente al analizar los cultivos de regadío (5). Aquellos regadíos más productivos se ubican en los espacios de menor elevación y que presentan unos bajos valores de pendiente. En el caso de los bosques, tanto frondosas (6), coníferas (7), como bosques mixtos (8), la mayor influencia es de la elevación. Ubicándose los bosques más productivos y activos en las áreas más elevadas del sector central del valle del Ebro, donde el estrés hídrico es menor y donde la disponibilidad de agua para cubrir sus necesidades está bastante asegurada.

En el caso de los matorrales (9), las áreas agrícolas con vegetación natural y los espacios de suelo desnudo con escasa cubierta vegetal, los valores de correlación son también elevados, con una relación directa entre elevación y ΣNDVI.

Así pues, se produce una clara diferenciación en la influencia del relieve sobre la producción vegetal entre aquellas áreas de vegetación natural, donde existe un importante control topográfico (siendo determinante la elevación) y las áreas de usos agrícolas, donde el peso de la topografía es inferior.

Sin embargo, muchos de los aspectos que señalan una importante influencia del relieve sobre la producción en las áreas de vegetación natural podrían no estar directamente influidos por las características topográficas sino, más bien, por el peso que presenta el relieve sobre diferentes elementos del clima. Hay que tener en cuenta que el relieve tiene un peso positivo sobre las precipitaciones medias que se registran a lo largo del año, mientras que tendrá una influencia negativa sobre las tempe-

raturas, aunque éstas también están condicionadas por otras variables geográficas (Vicente-Serrano *et al.,* 2003b). Así pues, junto a la influencia de las condiciones ambientales generales propiciadas por el relieve, y que presentan un peso diferenciado en función de los usos del suelo, debemos tener en cuenta también que la distribución espacial del NDVI puede estar muy influida por la distribución espacial de los elementos del clima. Por ello, se ha considerado un análisis a partir de las precipitaciones y temperaturas medias anuales para determinar su papel en la distribución anual de los valores de NDVI.

En la figura 24 se muestra la relación entre los valores anuales de ΣNDVI, y los de precipitaciones y temperaturas medias en la totalidad del área de estudio. La correlación es significativa en ambos casos (r = 0.6 en el caso de las precipitaciones y r = -0.43 en el de las temperaturas). Las precipitaciones parecen ser un factor mucho más limitante que las temperaturas para el desarrollo de la vegetación en el sector central del valle del Ebro. Además, las temperaturas no tienen un peso positivo en el crecimiento vegetal como el que se detecta en las montañas pirenaicas (Vicente-Serrano *et al.,* 2004), sino que limitan la actividad y producción de biomasa vegetal al aumentar la ETP y las pérdidas de agua.

A pesar de esta clara relación, positiva en el caso de las precipitaciones, y negativa en el de las temperaturas, existen algunos aspectos a considerar, como el amplio rango de valores de ΣNDVI correspondiente a precipitaciones por debajo de 500 mm, al igual que sucede en el intervalo térmico entre 14 y 16 ºC. Estas variaciones están condicionadas por el reparto espacial de los diferentes usos del suelo, por lo que, para una mejor comprensión de la influencia de las condiciones climáticas medias sobre la producción vegetal es necesario analizar la respuesta de los diferentes usos del suelo de forma particular.

En la tabla 8 se muestran los valores de correlación entre los valores medios de ΣNDVI y los de precipitaciones y temperaturas en los diferentes usos del suelo. Las variaciones espaciales de la productividad vegetal parecen muy condicionadas por la distribución espacial de precipitaciones y temperaturas y, de nuevo, tal como sucedía con el relieve, son los espacios de vegetación natural los más condicionados por las características climáticas medias.

figura 24

RELACIÓN ENTRE LA ACTIVIDAD VEGETAL ANUAL (ΣNDVI) Y LOS VALORES MEDIOS DE TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EN LA TOTALIDAD DEL ÁREA DE ESTUDIO.

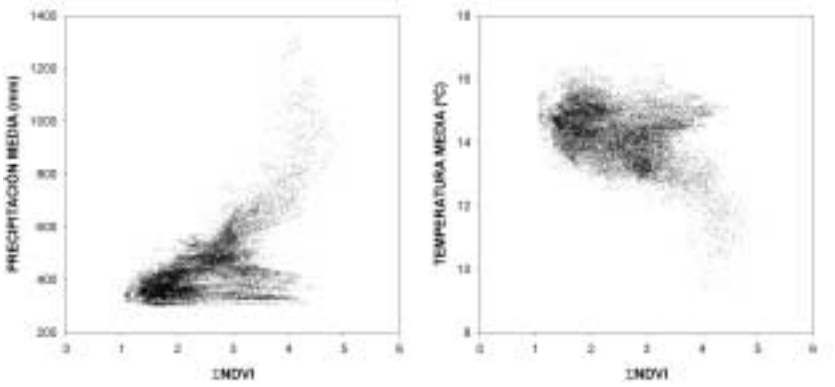


tabla 8

VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ΣNDVI Y LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS MEDIAS. TODAS LAS CORRELACIONES RESULTAN ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVAS (ρ <0.01)

USOS DEL SUELO	Precipitaciones	Temperaturas
Cultivos de secano (herbáceas)	0.71	-0.50
Cultivos de secano (permanentes)	0.46	-0.21
Cultivos de regadío	-0.11	0.14
Bosques de frondosas	0.86	-0.79
Bosques de coníferas	0.82	-0.73
Matorrales y pastizales	0.79	-0.59
Áreas agrícolas con veg. nat.	0.83	-0.64

Se comprueba la baja influencia de las características climáticas en los cultivos de regadío, donde la distribución de las precipitaciones no influye significativamente, ya que existe un aporte artificial de agua y donde, al contrario que en los otros usos del suelo, las temperaturas muestran una influencia positiva. Mientras no existan limitaciones de agua se mantendrán elevadas tasas de evapotranspiración sin que la vegetación quede sometida a estrés hídrico y, por tanto, ello dará lugar a una elevada actividad vegetal y a la producción de mayor cantidad de biomasa vegetal. Por esta razón, la gran diversidad de rangos de ΣNDVI para valores de precipitación entre 300 y 500 mm se explica por la presencia de cultivos de regadío, donde los aportes en riego interfieren en la relación directa entre precipitación y NDVI.

En realidad, se puede afirmar que las condiciones climáticas promedio están determinando la distribución de las formaciones vegetales en el territorio. Cada una de las formaciones vegetales se adapta a unas determinadas condiciones para hacer un uso lo más eficaz posible del agua que recibe. Le Houreu (1984) señala que la cantidad de producción vegetal que se obtiene por unidad de agua aportada es una buena medida de la eficacia del ecosistema en la generación de materia vegetal. En el caso del NDVI, diferentes autores (Nicholson *et al.,* 1990; Tucker *et al.,* 1991) han mostrado que el cociente entre los valores integrados de NDVI y los valores de precipitación confieren una idea muy aproximada de la eficacia biológica de los diferente ecosistemas. En la tabla 9 se muestran los resultados promedio de los diferentes usos del suelo. Si exceptuamos los cultivos de regadío, que ofrecen una información irreal ya que el agua que reciben no procede exclusivamente de la que llega en forma de precipitaciones, el resto de los usos del suelo presenta valores similares, lo que indica que su localización, porte y producción, se adaptan a unas condiciones climáticas promedio.

tabla 9

VALORES PROMEDIO DEL COCIENTE ΣNDVI/PRECIPITACIÓN EN LOS DIFERENTES USOS DEL SUELO.

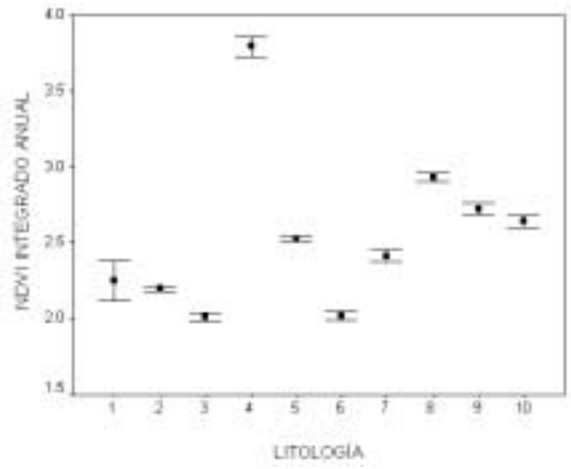
Usos del suelo	ΣNDVI/precipitación
cultivos de secano (herbáceas)	0.00502
cultivos de secano (permanentes)	0.00519
cultivos de regadío	0.00775
bosques de frondosas	0.00516
bosques de coníferas	0.00537
matorrales y pastizales	0.00515
áreas agrícolas con veg. nat.	0.00496

La distribución espacial del NDVI está, pues, muy condicionada por la localización de las diferentes formaciones vegetales y usos del suelo, por unos factores topográficos concretos y por la distribución media de los elementos climáticos. Sin embargo, existen otros factores que también hay que considerar, relacionados con el sustrato sobre el que se asienta la cubierta vegetal. En nuestro caso, y debido a la falta de cartografías sobre tipos de suelo en el sector central del valle del Ebro, se ha realizado un análisis considerando las características litológicas, comparando los valores promedio de ΣNDVI en función de las categorías litológicas existentes dentro del área de estudio. En este caso tam-

bién se registran diferencias significativas entre las distintas litologías, que quedan recogidas en la figura 25.

figura 24

VALORES MEDIOS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS VALORES ANUALES DE NDVI EN FUNCIÓN DE LAS PRINCIPALES LITOLOGÍAS EN LA TOTALIDAD DEL ÁREA DE ESTUDIO. LAS CATEGORÍAS HACEN REFERENCIA A 1: CUARCITAS Y PIZARRAS; 2: CALIZAS Y DOLOMÍAS; 3: CALIZAS Y MARGAS; 4: CALIZAS, MARGAS, ARENISCAS Y CONGLOMERADOS; 5: ROCAS DETRÍTICAS (ARENISCAS Y CONGLOMERADOS); 6: YESOS; 7: MATERIAL DETRÍTICO NO CONSOLIDADO (GLACIS); 8: MATERIAL DETRÍTICO NO CONSOLIDADO (TERRAZAS FLUVIALES); 9: MATERIAL DETRÍTICO NO CONSOLIDADO (ALUVIALES); 10: MATERIAL DETRÍTICO NO CONSOLIDADO (INDIFERENCIADO).



La litología sobre la que se asientan las áreas más productivas corresponde a sectores de rocas detríticas y calizas en el sector prepirenaico (promedio = 3.79), donde se ubican los bosques de coníferas y frondosas, coincidiendo con las mayores elevaciones, y las áreas donde se reciben las mayores precipitaciones medias de todo el sector central del valle del Ebro. El siguiente grupo lo engloban las áreas de material detrítico cuaternario (terrazas y aluviales; Peña *et al.,* 2002) que en muchos casos concentran áreas de cultivos de regadío muy productivos. Los valores promedio de ΣNDVI en estos grupos oscilan entre 2.6 y 2.9.

También hay que destacar que las formaciones litológicas sobre las que se asientan las formaciones vegetales de menor productividad corresponden a las áreas

calcáreas y yesíferas del centro de la depresión donde, junto a la aridez característica de este espacio, se une un sustrato que retiene con dificultad el agua, y unos suelos de gran fragilidad para su conservación debido a los importantes procesos de degradación y erosión que presentan (Machín y Navas, 1998). Además, estos espacios albergan formaciones herbáceas y arbustivas muy dispersas, en el caso de la vegetación natural, o cultivos cerealísticos de secano poco productivos. El promedio de ΣNDVI en ambas formaciones litológicas es de 2, lo que indirectamente indica la escasa cubierta vegetal que albergan estos espacios.

Aunque estos valores son indicativos de la influencia que ejerce la litología sobre la actividad vegetal en el sector central del valle del Ebro, hay que considerar que las diferencias en las formaciones vegetales naturales y en los usos antrópicos del espacio están, en cierta medida, condicionadas por las características ecológicas y edáficas, y es natural que aquellos espacios de suelos más pobres (calcáreos o yesíferos) sostengan cubiertas vegetales de menor productividad. Mayor interés presenta conocer como dentro de un mismo tipo de cubierta influyen dichas características litológicas, ya que el tipo de vegetación resultará más homogéneo y las diferencias que aparezcan podrán asignarse de forma más fiable a las características del sustrato.

Se han analizado las dos cubiertas del suelo más características del sector central del valle del Ebro: los cultivos herbáceos de secano y las áreas de pastizales y matorrales. En el primer caso se registran diferencias muy significativas (superiores al 50 % del total) en función de la litología sobre la que se asientan (Figura 26). Mientras las áreas de litologías cuaternarias (aluviales o terrazas fluviales) indican las más elevadas producciones (en torno a 2.5 de promedio) se produce una diferenciación muy significativa con las áreas calcáreas (3) y yesíferas (6) que indican producciones anuales promedio muy bajas (alrededor de 1.7). La productividad de los cultivos de secano está, pues, determinada por las propiedades del sustrato donde se asientan, siendo poco adecuadas las extensas áreas del centro del valle cuyo sustrato litológico retiene con dificultad el agua. En este espacio la vegetación se verá sometida con mayor frecuencia a condiciones de estrés hídrico, que se traducirán en un menor crecimiento y en una mayor vulnerabilidad con relación a las condiciones climáticas.

En la figura 27 se muestran las diferencias de ΣNDVI en función de la litología en las áreas de matorrales y pastizales. En este caso los contrastes son todavía más patentes, destacando la productividad de las comunidades de matorral que se ubican sobre los depósitos detríticos y calizos del Prepirineo, en un área con adecuadas condiciones de

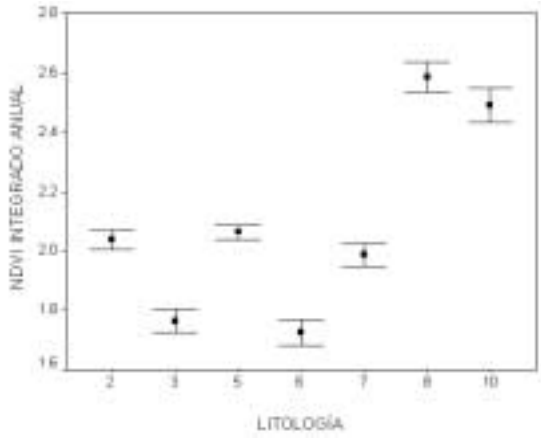
humedad. Frente a ello vuelven a aparecer los espacios yesíferos del centro de la depresión como aquellos en los que la capacidad productiva de estas formaciones vegetales es inferior, tal como sucedía con los campos de secano. Guerrero *et al.* (1999) analizaron las condiciones a las que se ve sometida la vegetación herbácea y arbustiva en los suelos yesíferos del sector central del valle, comprobando que tanto la degradación como la fuerte erosión a la que están sometidos amplios espacios limitan un adecuado desarrollo de la cubierta vegetal.

Se ha comprobado, pues, que las diferentes características topográficas, edáficas o climáticas medias del área de estudio determinan la distribución espacial de los usos del suelo (en relación con sus características en la utilización del agua) y, por tanto, de la producción y estacionalidad de la actividad vegetal.

Hay que tener en cuenta que las interrelaciones que se producen entre las diferentes variables: tipos de cubiertas y usos del suelo, topografía, litología o tipo de suelo podrían explicar en mayor medida la riqueza espacial que se produce en los valores de NDVI. Sin embargo, un análisis más específico, que analice estas interrelaciones excede los objetivos de esta investigación. Se han mostrado algunos de los rasgos generales que explican la distribución del NDVI, comprobando que la distribución espacial de las cubier-

figura 26

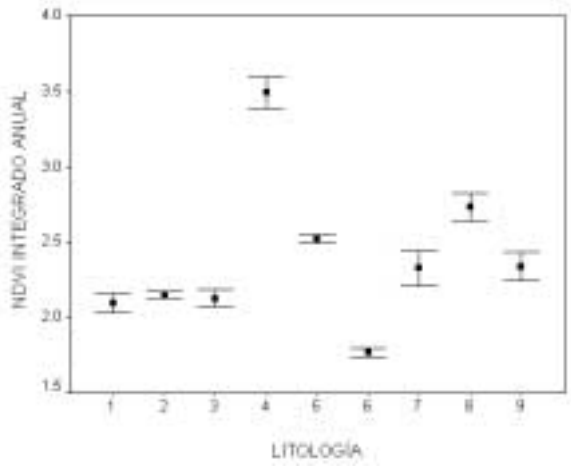
MEDIAS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS VALORES ANUALES DE NDVI, EN FUNCIÓN DE LAS PRINCIPALES LITOLOGÍAS, EN LAS ÁREAS DE CULTIVOS DE SECANO. LOS CÓDIGOS DE LAS CATEGORÍAS DE LITOLOGÍA SE CORRESPONDEN CON LOS DE LA FIGURA 25.



tas del suelo explica, en mayor medida, la diferenciación espacial de los valores de NDVI, pero que la ubicación de las diferentes categorías está muy determinada por las condiciones climáticas medias (fundamentalmente pluviométricas) y por la topografía, matizando el sustrato las diferencias a escala más local.

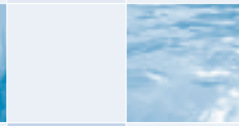
figura 27

MEDIAS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS VALORES ANUALES DE NDVI, EN FUNCIÓN DE LAS PRINCIPALES LITOLOGÍAS, EN LAS ÁREAS DE MATORRALES Y PASTIZALES. LOS CÓDIGOS DE LAS CATEGORÍAS DE LITOLOGÍA SE CORRESPONDEN CON LOS DE LA FIGURA 25.



A continuación se abordan aspectos relacionados con la dinámica intrínseca de estos ecosistemas, con el objetivo de determinar su variabilidad espacio-temporal y explicar como el clima y, fundamentalmente, las sequías han influido sobre las anomalías en la actividad vegetal registradas entre los años 1987 y 2000.

la variabilidad interanual de la cubierta vegetal



5. La variabilidad interanual de la cubierta vegetal

Los patrones espaciales del NDVI que se han mostrado en el conjunto del área de estudio son muy nítidos y están relacionados con la distribución de los principales usos y cubiertas del suelo. Sin embargo, la caracterización espacial no resulta totalmente completa considerando exclusivamente estas medidas, ya que junto a los patrones promedio, las oscilaciones y variabilidad intra e interanualmente pueden resultar muy significativas.

La determinación de la variabilidad de la cubierta vegetal presenta un gran interés con relación al fenómeno climático analizado (la sequía). Dado que los factores estructurales que condicionan el NDVI (tipo de cubierta, litología o topografía) resultan muy estables a la escala temporal de análisis, la variabilidad interanual estará condicionada, fundamentalmente, por las condiciones climáticas, ya que el clima es el factor más variable en el tiempo (otros factores no climáticos también podrían incidir en la ocurrencia de diferencias interanuales de NDVI: incendios forestales o plagas, aunque su peso resulta más localizado, y se trata de fenómenos poco frecuentes en el tiempo dentro del área de estudio). Por ello, la identificación de los espacios más variables resulta de gran interés, ya que esto puede indicar su resistencia o dependencia ante las condiciones climáticas y puede ser un primer indicativo del diferente grado de vulnerabilidad de las cubiertas y ecosistemas del área de estudio con relación a la ocurrencia de sequías.

Hay que tener en cuenta que los cambios de uso del suelo que se han producido durante los últimos años han resultado mínimos, y únicamente algunas nuevas áreas de regadío en los Monegros han alterado significativamente la configuración espacial de la producción vegetal en el sector central del valle del Ebro. Por esta razón, las variaciones interanuales que tengan lugar podrán asignarse, de forma general, a factores de carácter dinámico, como es el clima (Kogan, 1990).

En diferentes regiones del mundo se han realizado trabajos en los que se analiza la variabilidad de la cubierta vegetal por medio de imágenes de satélite para identificar las áreas cuya dinámica vegetal está determinada en mayor medida por las condiciones climáticas. Sobre todo destacan los trabajos que se han realizado en el Sahel (Nicholson *et al.,* 1998; Tucker *et al.,* 1991b), que han comprobado que se trata de un área especialmente sensible a las variaciones climáticas interanuales y sujeta a una importante variabilidad. La técnica más utilizada para determinar las diferencias espaciales en dicha

variabilidad interanual es la aplicación del coeficiente de variación a las series mensuales o anuales de NDVI.

Milich y Weiss (1997) y Weiss y Milich (1997) aplicaron el coeficiente de variación a las series temporales de NDVI en el centro de África y el Sahel, lo que les permitió identificar una amplia franja al sur del Sahara en la que se produce una gran variabilidad interanual en el NDVI, y comprobar que se trata de espacios muy sensibles a las variaciones climáticas interanuales. El mismo método es aplicado por Fang *et al.* (2001), que analizaron la variabilidad interanual del NDVI en China, comparándola con la distribución espacial de los parámetros climáticos. Estos autores comprobaron en su conjunto una mayor variabilidad en las áreas de vegetación herbácea y en las regiones desérticas. El número de estudios que analizan la variabilidad temporal de la cubierta vegetal en otros ámbitos es inferior y, en general, los resultados muestran que son los espacios semiáridos ocupados por vegetación herbácea los que presentan variaciones interanuales superiores, como consecuencia de su mayor dependencia respecto a las condiciones climáticas (Wang *et al.,* 2003).

Se ha calculado el coeficiente de variación interanual en cada uno de los píxeles de 1 x 1 km a una escala mensual y anual entre 1987 y 2000. El análisis mensual se recoge en la figura 28, donde se observan significativas diferencias espaciales. Las áreas de mayor variabilidad indican diferencias de NDVI más importantes entre años y, salvo algunos espacios cuya importante variabilidad se debe a actuaciones antrópicas (nuevos regadíos en Monegros), el resto de los espacios de gran variabilidad vegetal responden a condiciones climáticas más limitantes.

En enero las áreas más variables están situadas en la provincia de Huesca, y la distribución espacial está estrechamente relacionada con la distribución de las diferentes cubiertas del suelo. Las áreas más variables corresponden a espacios ocupados por cultivos de secano, matorrales y pastizales en la margen izquierda del Ebro, donde se llegan a alcanzar coeficientes de variación superiores a 0.2. Las diferencias de humedad que se producen entre inviernos secos o lluviosos, o bien entre inviernos fríos o cálidos, introducirán diferencias en el mes que comienza la actividad vegetal en estas áreas. En los espacios centrales del valle o en los secanos y pastizales de la margen derecha la variabilidad es inferior, al igual que en todas las áreas boscosas. Dado que en las áreas de la Hoya de Huesca las precipitaciones son más abundantes y, por lo tanto, más segura la disponibilidad de humedad, la existencia de inviernos con temperaturas suaves permitirá un desarrollo más temprano de la vegetación, mientras que en el sector central del

valle las importantes limitaciones hídricas que caracterizan este espacio no permitirán el desarrollo vegetal, aunque las condiciones térmicas sean favorables. Además, en invierno las inversiones térmicas son muy frecuentes en el centro del valle y no es raro que los secanos de este espacio estén sometidos a temperaturas más frías que los ubicados en el sector más septentrional, aspecto que también será un limitante importante de la actividad vegetal y que reducirá las diferencias interanuales.

En febrero se mantienen los mismos patrones espaciales de variabilidad. No obstante, los valores absolutos se incrementan en todas las áreas de cultivos de secano, pastizales y matorrales, mientras que en las áreas de bosques de coníferas del centro de la depresión se mantiene una baja variabilidad.

Durante la primavera (Mrz-Abr-My) la variabilidad se reduce, siendo más variables los campos de secano y pastizales del centro del valle. Por el contrario, los secanos de la Hoya de Huesca muestran un descenso de la variabilidad respecto a los meses invernales. El que la mayor variabilidad primaveral se registre en los espacios centrales del valle, en áreas de vegetación fundamentalmente herbácea, es un importante indicativo de la vulnerabilidad de estos espacios ante las condiciones hídricas. En una estación en la que las temperaturas son suaves y permiten una elevada actividad vegetal, la variabilidad interanual estará más condiciona por las diferencias de humedad que se producen entre los diferentes años.

En los meses estivales aparecen áreas cuya elevada variabilidad interanual está determinada por actuaciones antrópicas (el desarrollo de nuevas áreas de regadíos en el polígono de Monegros II). En el resto del área de estudio destaca la escasa variabilidad de las áreas de cultivos de regadío y el hecho de que las áreas de bosques presenten una variabilidad inferior a otras cubiertas naturales. A pesar de ello, los contrates espaciales en la variabilidad vegetal son menos acentuados que en invierno, aunque se producen diferencias significativas en los patrones espaciales entre ambas estaciones. En invierno, la mayor variabilidad se registra en las áreas de cultivos de secano y en los pastizales y matorrales de la provincia de Huesca, mientras que en verano la mayor variabilidad corresponde a las formaciones naturales no arbóreas del centro del valle que, habitualmente, están sometidas a un importante estrés hídrico, y su actividad estará más condicionada por la disponibilidad de humedad que se conserve en el suelo, o por la que aporten eventos meteorológicos puntuales durante el verano.

Durante el otoño se reduce la variabilidad, registrándose una homogeneización espacial, aunque se siga comprobando que son los espacios boscosos y los regadíos los de menor variabilidad. Durante esta estación se pasa a un estado de baja actividad dentro del ciclo fenológico de la vegetación, por lo que las diferencias en las condiciones climáticas incidirán en menor medida, ya que la cubierta vegetal presentará una menor sensibilidad ante dichos eventos climáticos. Llamativos son los bajos valores del coeficiente de variación en diciembre, mes de latencia en la mayor parte de las formaciones vegetales.

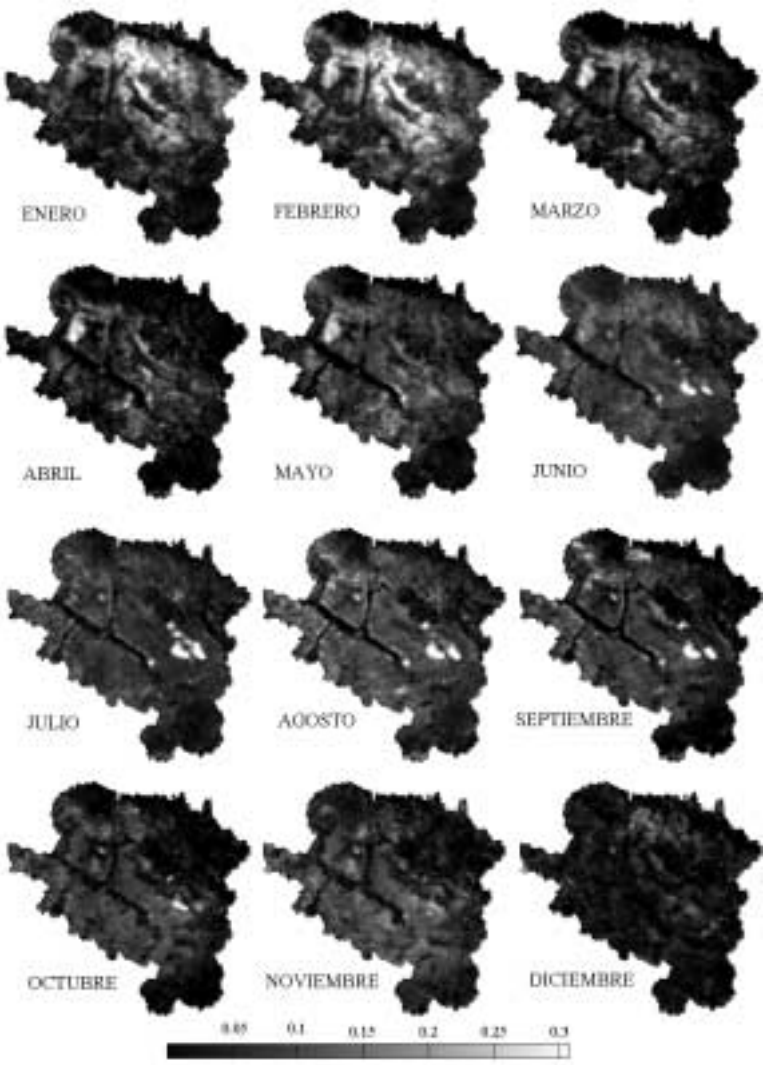
A pesar de que se ha comprobado que existen diferencias en la variabilidad dentro de las áreas ocupadas por un mismo uso del suelo, en función de su localización espacial, el resumen mensual del comportamiento general de los diferentes usos del suelo permite establecer significativos patrones de variación en función de la cubierta vegetal existente. En la figura 29 se registran los valores promedio de los coeficientes de variación en diferentes cubiertas vegetales los distintos meses del año. Se comprueban diferencias significativas, siendo llamativo el hecho de que las áreas de vegetación natural (bosques de frondosas, coníferas o matorrales y pastizales) muestran una variabilidad general inferior a la que registran las áreas de cultivos de secano, sean herbáceos o permanentes.

Las curvas temporales de variabilidad muestran un similar comportamiento. La mayor variabilidad en las áreas de vegetación natural se registra en los meses estivales y durante el invierno, mientras que una baja variabilidad interanual es registrada en los meses primaverales y otoñales. La variabilidad se incrementa en todos los meses en aquellas áreas en las que se produce una convivencia de áreas de vegetación natural y de cultivos de secano, mientras que los bosques de frondosas indican una variabilidad muy baja, sobre todo en los meses primaverales. Su localización en áreas de mayores aportes pluviométricos determina una menor dependencia respecto a las condiciones hídricas del suelo. Además, los más desarrollados sistemas radiculares contribuyen también a una captación más profunda de agua, y a que la dependencia respecto a las condiciones climáticas resulte inferior.

Así pues, las curvas temporales de los cultivos de secano muestran diferencias respecto a las áreas de vegetación natural, pero la distribución varía considerablemente entre los cultivos permanentes y los herbáceos. En los cultivos de secano herbáceos la mayor variabilidad se produce durante los meses invernales debido a los elevados valores que presentan los cultivos localizados en el sector norte, en la comarca de la Hoya de

figura 28

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN INTERANUAL EN LOS DIFERENTES MESES DEL AÑO



Huesca. En cambio, los cultivos permanentes muestran una baja variabilidad en estos meses invernales, y dicha variabilidad se incrementa desde la primavera hasta los meses estivales, donde se alcanza el máximo anual. La localización de estos secanos perma-

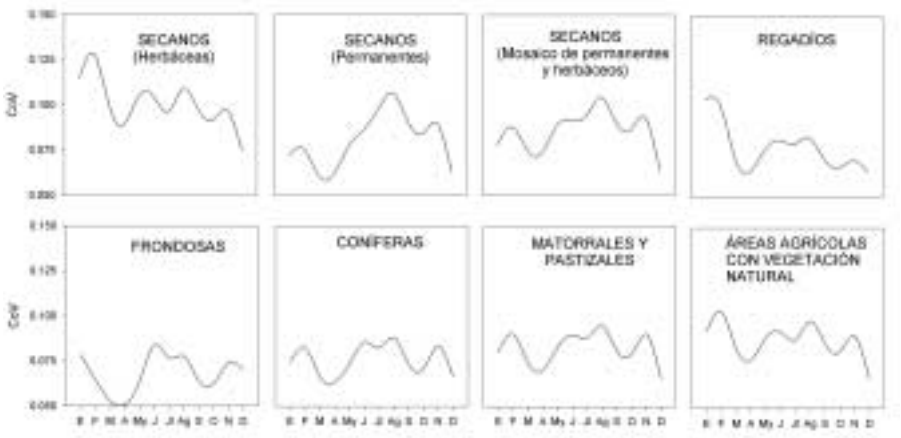
nentes en el sector central del valle (viñedos y olivos fundamentalmente) supondrá que en verano, estación en la que todavía existe una elevada actividad vegetal en estas cubiertas, el estado de la vegetación dependa en gran medida de las disponibilidades de humedad del suelo.

Los cultivos de regadío muestran los más bajos valores de variabilidad a lo largo de los diferentes meses del año, excepto en enero y febrero. En primavera, verano y otoño, el aporte de agua evitará las condiciones de estrés hídrico y amortiguará la variabilidad que pudieran provocar las condiciones pluviométricas.

Hay que señalar que las diferencias existentes entre los cultivos de secano y de regadío en el sector central del valle pueden ser indicativas del papel de la disponibilidad de agua en el desarrollo vegetal. En las áreas de regadíos, donde no se producen importantes fluctuaciones en la disponibilidad de recursos hídricos, las variaciones interanuales son escasas en los momentos en los que la evapotranspiración es más elevada (primavera, verano y otoño), mientras que en los secanos se registra una variabilidad importante. Las condiciones térmicas que soportan ambos tipos de cubierta son similares, por lo que las importantes diferencias podrán asociarse a la disponibilidad de agua en el suelo, determinada, en los secanos, por la cantidad de precipitaciones que reciben.

figura 29

VALORES PROMEDIO DE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN MENSUAL EN LOS DIFERENTES USOS DEL SUELO.

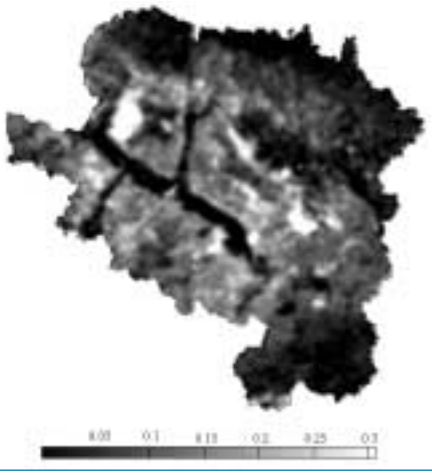


Los análisis a escala anual permiten establecer diferenciaciones más nítidas. En la figura 30 se muestran los patrones generales de variabilidad a partir de los datos de ΣNDVI. Sin considerar aquellos espacios en los que se han introducido nuevos regadíos y que registran una elevada variabilidad interanual, se puede comprobar que existe una clara diferenciación espacial. Las áreas más variables se reconocen nítidamente en el sector central del valle, en los sectores de secanos y en los pastizales en las Cinco Villas, Belchite y Monegros. Las áreas de regadíos (sobre todo los tradicionales ubicados en el curso del Ebro) muestran una baja variabilidad interanual, pero también las áreas boscosas del norte y sur del área de estudio. Se observa, por ejemplo, la existencia de dos "islas" de variabilidad baja en el centro del valle, ubicadas entre espacios de elevada variabilidad interanual, que corresponden con los bosques de coníferas en los montes de Zuera y Alcubierre, más estables temporalmente que las áreas de vegetación herbácea y arbustiva que los rodea.

Así pues, en espacios de elevada variabilidad pluviométrica como el analizado se puede señalar que aquellos usos en los que la productividad es más estable y segura coincide con los cultivos de regadío y los bosques, mientras que tanto los secanos como los pastizales muestran una mayor incertidumbre. En el primer caso la aportación de agua de riego limitará la vulnerabilidad de estas áreas, mientras que la mayor profundidad de los sistemas radiculares de los bosques permitirá la captación del agua retenida a diferentes niveles y, por lo tanto, la dependencia respecto a las precipitaciones resultará inferior. En cambio, los sis-

figura 30

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN ANUAL



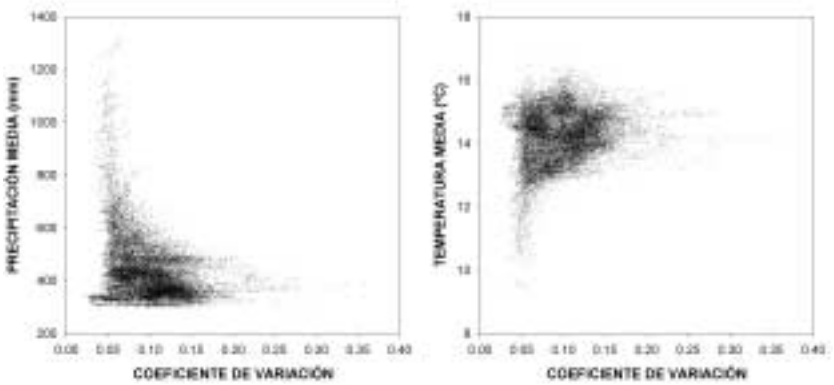
temas radiculares de las especies herbáceas y arbustivas que se ubican en los espacios más áridos tendrán menores posibilidades de captación de agua y, por lo tanto, serán más dependientes respecto a unas condiciones climáticas que son muy variables y limitantes.

En la figura 31 se muestran los diagramas de dispersión entre los valores de variabilidad interanual de la vegetación y los de precipitación y temperatura media. Existe una clara relación no lineal entre los valores de ambas variables y los coeficientes de variación registrados en el conjunto del área de estudio. En el caso de las precipitaciones se comprueba que las áreas de mayor variabilidad se concentran en los espacios que reciben menores precipitaciones y cuyas temperaturas medias son más elevadas. Aquellas áreas que reciben las mayores precipitaciones y las regiones más frías presentan bajos coeficientes de variación. Sin embargo, el rango de variabilidad correspondiente a las áreas de valores más bajos de precipitación o más altos de temperatura es muy elevado, aspecto que estará condicionado por la diversidad de usos del suelo (regadíos, secanos o bosques) que existe en estas áreas.

Es más conveniente eliminar la variación diferencial que introduce la diversidad de usos del suelo y comunidades vegetales. En la tabla 10 se muestran las correlaciones entre los valores de precipitación media y los de variabilidad de la cubierta vegetal a escala anual. Ya que como se ha comprobado, las relaciones no son lineales, se ha utilizado el test no paramétrico Rho de Spearman para su cálculo (Siegel y Castelan, 1988).

figura 31

RELACIÓN ENTRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN Y LAS PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO.



Existe una relación negativa entre los valores del coeficiente de variación y las precipitaciones medias en todos los usos del suelo, mientras que la relación es positiva en el caso de las temperaturas. Sin embargo, las diferencias en las magnitudes absolutas son importantes. La distribución espacial de la variabilidad en las áreas de bosques y matorrales indica una estrecha relación con la distribución de las precipitaciones, mientras que la relación es menor en los cultivos de secano.

En los cultivos de regadío la correlación entre precipitación y variabilidad en el NDVI es positiva, y negativa la correlación entre dicha variabilidad y la distribución de las temperaturas medias. La variabilidad de los regadíos estará más condicionada, pues, por las temperaturas. En el sector estudiado existe una estrecha relación inversa entre el reparto espacial de precipitaciones y temperaturas medias (r = -0.83), y aquellos regadíos ubicados en los espacios más fríos (que coinciden con los más lluviosos) muestran una variabilidad superior. En este caso no existen limitaciones hídricas para el normal desarrollo de la vegetación, pero la producción de aquellos que se localizan en los sectores más fríos dependerá en mayor medida de las características térmicas del año, ya que los años fríos reducirán las tasas de ETP y, por tanto, la actividad vegetal. En las zonas más cálidas esta limitación no tendrá lugar, lo que permite una mayor actividad vegetal, dando lugar a una menor variabilidad interanual.

Así pues, en general, la variabilidad de la cubierta vegetal está muy determinada por los valores pluviométricos medios, excepto en el caso del regadío, cuya variabilidad se verá más condicionada por el reparto de los valores térmicos.

tabla 10

CORRELACIÓN (RHO DE SPEARMAN) ENTRE EL COEFICIENTE DE VARIACIÓN ANUAL Y LAS PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES CONSIDERANDO PARTICULARMENTE LOS USOS DEL SUELO MÁS REPRESENTATIVOS DEL ÁREA DE ESTUDIO. * SIGNIFICATIVO ($p < 0.05$), ** SIGNIFICATIVO ($p < 0.01$).

Usos del suelo	Precipitaciones medias	Temperaturas medias
Cultivos de secano (herbáceas)	-0.26**	0.11*
Cultivos de secano (permanentes)	-0.36**	-0.49**
Cultivos de regadío	0.39**	-0.42**
Bosques de frondosas	-0.71**	0.59**
Bosques de coníferas	-0.61**	0.49**
Matorrales y pastizales	-0.54**	0.38**

5.1 Análisis de la evolución temporal de la cubierta vegetal mediante series NDVI en el sector central del valle del Ebro (1987-2000)

Si se asume que las características edáficas y los usos del suelo no cambian significativamente en el área de estudio, la comparación de las variaciones inter e intranuales del NDVI informará de las condiciones de la vegetación con relación a la dinámica climática. Con ello se pueden determinar los periodos en los que la vegetación ha mostrado las principales anomalías negativas en su actividad y, de este modo, determinar si existe asociación con las sequías.

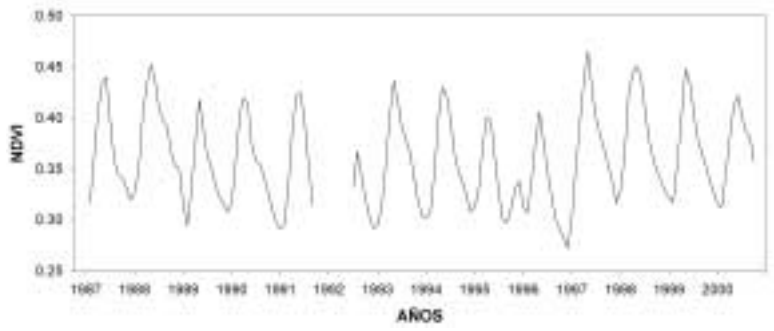
Si se analiza la actividad vegetal entre los años 1987 y 2000, considerando la totalidad del área de estudio, se comprueba la existencia de notables diferencias interanuales (Figura 32). Esta aproximación supone una excesiva suavización, eliminando la diversidad espacial que se produce con las diferentes cubiertas y usos del suelo. A pesar de ello, este análisis permite reconocer los aspectos más generales de la evolución vegetal.

Se observa una clara ciclicidad anual, con máximos en primavera y mínimos en invierno, existiendo un rango medio anual de 0.15 unidades. No obstante, las diferencias interanuales son muy significativas, tanto en la amplitud de las curvas anuales como en el rango intranual. Los años 1987 y 1988 indican curvas anuales de mayor superficie y en las que los máximos superan valores de NDVI de 0.44. Al igual sucede durante los años 1997, 1998 y 1999, comprobando que el máximo de actividad vegetal se registró en abril de 1997, con un NDVI de 0.46. Se identifica un descenso brusco en los valores de actividad vegetal después de 1987 y 1988, años tras los cuales la actividad vegetal se mantuvo en niveles muy inferiores (con la excepción de 1993), sobre todo en los años 1995 y 1996, en los que tanto los valores máximos como la superficie de las curvas experimentaron un descenso muy significativo. Tras estos dos años, en los que se registra la menor actividad vegetal del periodo analizado, en 1997 se asiste a un repunte importante que se mantiene durante los años finales de la década.

Sin embargo, la evolución temporal dentro del área de estudio puede presentar una importante diversidad, dada la heterogeneidad geográfica existente en forma de diferentes topografías, usos y cubiertas del suelo, etc. Por ello resultaba necesario analizar la evolución temporal de forma más detallada, considerando la diversidad geográfica existente.

figura 32

EVOLUCIÓN DEL NDVI EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO



Un análisis a escala anual permite determinar mejor las importantes diferencias que han tenido lugar, eliminando la estacionalidad natural de la vegetación. Para ello se han analizado los datos resultantes de la integración del NDVI anual, considerando una escala temporal de años agrícolas (septiembre-agosto). En la figura 33 se recoge la evolución de los valores promedio en toda el área de estudio, donde se pueden apreciar las importantes diferencias registradas entre los años 1989-1996, por un lado (con valores bajos de ΣNDVI muy acentuados en 1995 y 1996) y los años comprendidos entre 1997 y 2000.

Un análisis espacial de esta evolución se muestra en la figura 34, donde los principales aspectos a destacar son las importantes diferencias interanuales en los valores absolutos de ΣNDVI, ya que los patrones espaciales son similares entre los distintos años, con bajas producciones vegetales en el centro de la depresión y elevada productividad en el extremo norte y en los espacios ocupados por el regadío.

Los años de mayor actividad vegetal (1988 y el periodo entre 1997 y 2000) muestran que los secanos y pastizales del centro de la depresión no registraron valores inferiores a 1.5, salvo en concretos espacios de Monegros y de la comarca de Belchite, donde la cubierta vegetal es escasa. En los bosques del norte se llegan a alcanzar valores superiores a 5 en los años 1988 y 1998. Frente a ello, entre los años 1989 y 1996 el sector central del valle registró producciones muy inferiores, sobre todos en los años 1991, 1995 y 1996. En los bosques y regadíos, a pesar de mostrar valores superiores a los seca-

nos y pastizales del centro de la depresión, las diferencias también fueron muy importantes respecto a la actividad vegetal de los años más productivos.

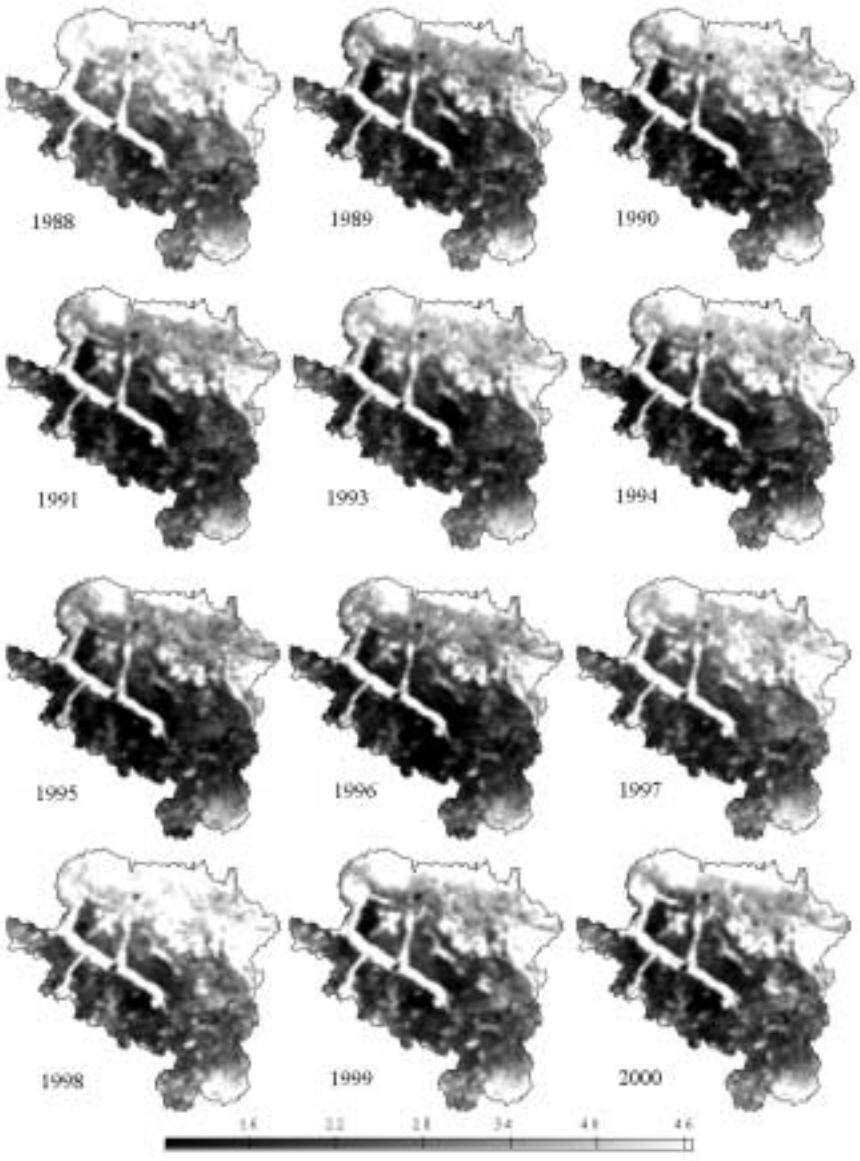
figura 33

EVOLUCIÓN DE LOS VALORES DE ΣNDVI PROMEDIO EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Las condiciones espaciales pueden, pues, resultar muy contrastadas entre unos y otros años y el paisaje vegetal mostrar diferencias significativas en cuanto a su estado, con años en los que la cubierta vegetal natural resulta más o menos densa, tanto el área foliar de los árboles como el tapiz herbáceo o arbustivo que cubre el suelo.

figura 34

VALORES DE ΣNDVI ANUALES. AÑOS AGRÍCOLAS (SEPTIEMBRE-AGOSTO).



influencia del clima sobre la dinámica vegetal en el sector central del valle del ebro

6. Influencia del clima sobre la dinámica vegetal en el sector central del valle del Ebro

Entre los factores que pueden producir las diferencias temporales en las series de NDVI pueden contarse distintas actuaciones antrópicas relacionadas con el sobrepastoreo (Fuller, 1998; Washington-Allen *et al.,* 1998; Oesterheld *et al.,* 1998), la desertificación (Holm *et al.,* 2003; Collado *et al.,* 2002), la deforestación (Hudak y Wessman, 2000; Walsh *et al.,* 2001; Chuvieco *et al.,* 2002), el abandono de los usos del suelo tradicionales y el avance en las etapas de sucesión vegetal (Vicente-Serrano *et al.,* 2004) o los incendios forestales (Salvador y Pons, 1996; Díaz-Delgado *et al.,* 2002), que producen variaciones interanuales bruscas en los valores de NDVI, o incluso cambios en las tendencias de dichas series temporales.

Sin embargo, todos estos fenómenos suelen tener un comportamiento más local. Las variaciones que afecten a amplios espacios en momentos puntuales (Walsh, 1987; Reed, 1993; Kogan, 2000) o incluso cambios en las tendencias de evolución temporal (Slayback *et al.,* 2003; Myneni *et al.,* 1998) se asociarán, principalmente, a fenómenos climáticos de magnitud extraordinaria o a aspectos relacionados con el cambio global (Lucht *et al.,* 2002).

Por esta razón, la mayor parte de los estudios que analizan la variabilidad temporal de la cubierta vegetal mediante imágenes de satélite centran su atención en la incidencia de factores de carácter climático. Durante las pasadas dos décadas, diferentes estudios han utilizado el NDVI para analizar la respuesta de la vegetación a las fluctuaciones climáticas en África (Tucker *et al.,* 1983; Townshend y Justice, 1986; Malo y Nicholson, 1990; Davenport y Nicholson, 1993), EE.UU. (Di *et al.,* 1994; Yang *et al.,* 1997), o a escala global (Schultz y Halpert, 1993). De estos estudios podemos concluir que las variaciones temporales del NDVI están íntimamente relacionadas con las precipitaciones, siendo estas relaciones lineales (Malo y Nicholson, 1990) o log-lineales (Davenport y Nicholson, 1993).

Por ejemplo, Braswell *et al.* (1997) analizaron la interacción existente entre el NDVI y las temperaturas a escala global, comprobando que el NDVI responde directa y positivamente a las anomalías de temperatura en los ecosistemas fríos, mientras que las temperaturas tienen un negativo impacto sobre el crecimiento de la vegetación en espacios semiáridos, debido al incremento del estrés hídrico.

La dinámica estacional de la vegetación está determinada, fundamentalmente, por factores de carácter climático. Potter y Brooks (1998) indican que alrededor del 70% - 80% de la variación global en las curvas de NDVI puede ser explicada mediante la utilización de un pequeño número de índices climáticos utilizados como variables predictoras. En el caso de las temperaturas, Schultz y Halpert (1995) analizaron la relación existente entre el NDVI y diferentes variables climáticas a escala global, mostrando la estrecha relación entre los ciclos anuales de temperaturas y de NDVI en el hemisferio norte.

En las regiones de características semiáridas, como es el caso del sector central del valle del Ebro, la respuesta de la vegetación se produce, fundamentalmente, con relación a las condiciones de humedad del suelo (Le Houerou, 1984; Bonifacio *et al.,* 1993). Sin embargo, la principal fuente natural de humedad del suelo es la precipitación, y ya que es imposible obtener información de humedad del suelo en amplias áreas, numerosos investigadores han estudiado las relaciones entre el NDVI y las precipitaciones (Tucker *et al.,* 1985; Nicholson *et al.,* 1990; Schultz y Halpert, 1993). Con relación a las precipitaciones, uno de los primeros trabajos que estudió la relación existente entre la producción de biomasa vegetal medida con imágenes de satélite y las precipitaciones es el de Tucker *et al.* (1985), que analizaron la interacción entre ambas variables en el Sahel entre los años 1980 y 1984. Estos autores observaron una relación positiva y significativa entre ambos parámetros, comprobando que existen importantes variaciones espaciales en la cantidad de biomasa vegetal entre diferentes años, y que las diferencias son más importantes durante los años más secos. Nicholson *et al.* (1990) señalan que en el Sahel y el este de África los patrones espaciales de los valores del NDVI integrado reflejan, de forma muy precisa, los promedios anuales de precipitación, indicando una buena relación entre las variaciones de precipitación y las de NDVI a escalas estacionales e interanuales en las áreas en que la precipitación anual oscila entre 200 y 1200 mm. Estos autores comprueban que un valor anual de ΣNDVI en torno a 2.0 corresponde *grosso modo* con precipitaciones anuales en torno a 600 mm, mientras que un valor de 1.0 corresponde aproximadamente a 250 mm por año.

No obstante, los ciclos anuales de NDVI están determinados, generalmente, por la dinámica térmica. Schultz y Halpert (1995) analizan la relación existente entre la evolución del NDVI y los registros de temperaturas y precipitaciones a escala global. Señalan que las más elevadas correlaciones con las precipitaciones se producen en las regiones extratropicales ($r > 0.75$: Este de Asia, interior de Norteamérica y en las regiones del Sahel). En estas regiones, los ciclos anuales de ambas variables tienden a ser muy pro-

nunciados y a ocurrir durante el verano. Sin embargo, señalan que las más negativas correlaciones en las medias latitudes se producen en el oeste de España, noroeste de EE.UU. y sudeste de Chile, áreas donde el pico de precipitación se produce en invierno, mientras que el máximo de NDVI se registra en verano, por lo que estos autores señalan que la evolución anual del NDVI en estas áreas está determinada fundamentalmente por la temperatura.

Así pues, las temperaturas también pueden tener una influencia directa sobre el crecimiento vegetal. Yang *et al.* (1997) estudiaron la relación entre NDVI y temperatura en Nebrasca (USA) y observaron una estrecha relación entre el NDVI y la temperatura del suelo. En el sector central del valle del Ebro los picos de actividad vegetal se producen durante la estación primaveral en las áreas de cultivos herbáceos de secano y en los matorrales y pastizales. La suavización térmica tras el invierno permite un buen desarrollo de la vegetación siempre que las condiciones hídricas sean adecuadas. En las áreas de regadío, donde no existe una limitación hídrica, las curvas temporales de vegetación están condicionadas por la variabilidad térmica intranual.

La relación de la evolución del NDVI con los valores de transpiración puede ser mayor que la relación con las precipitaciones o los balances hídricos del suelo, siempre que no haya limitación de agua en el suelo (Millington *et al.,* 1994). En este sentido, Kerr *et al.* (1989) relacionaron la evolución temporal del NDVI acumulado, a lo largo del año 1986, con la acumulación de valores de ETP en Senegal, señalando una relación lineal en ambos casos (r = 0.99). Indican que con una adecuada disponibilidad de agua, la evolución del NDVI a lo largo del año estará determinada por las tasas de ETP, siendo el incremento vegetal mayor cuanto mayor sea la ETP. En el Sahel, Milich y Weiss (2000) también utilizan datos anuales integrados de NDVI para comprobar que la actividad vegetal de amplios espacios se encuentra más condicionada por la evapotranspiración real que por las precipitaciones.

La respuesta de la vegetación ante las condiciones hídricas del suelo ha sido frecuentemente abordada en la bibliografía, existiendo múltiples trabajos que relacionan la evolución de la vegetación (a partir de series temporales de NDVI) con el contenido de agua del suelo (Bonifacio *et al.,* 1993; Farrar *et al.,* 1994). Narasimha-Rao *et al.* (1993) comprobaron la existencia de una estrecha relación entre la humedad del suelo en la zona de la raíz de las plantas y el NDVI, aunque señalaron que esa relación está en función del tipo de cultivo, aspecto lógico dados los diferentes sistemas radiculares de las distintas especies y los mecanismos de absorción de agua. En este sentido, Lo Seen

Chong *et al.* (1993) indican una estrecha relación lineal entre la humedad del suelo y los valores integrados de NDVI en África, si bien, estas relaciones varían en función de los meses del año, tipos de suelo o vegetación.

Los estudios sobre la relación entre el NDVI y la disponibilidad de agua en el suelo deberían estar dirigidos a un mejor conocimiento de los factores medioambientales que limitan el crecimiento vegetal. Idealmente la comparación debería partir de unas adecuadas mediciones de humedad del suelo; sin embargo, las mediciones de este parámetro a escalas regionales y temporalmente continuas son escasas, por lo que una alternativa útil es la precipitación o bien la utilización de modelos teóricos de balance hídrico.

6.1. Metodología

El análisis espacio-temporal de series mensuales de NDVI y las variables de carácter climático se ha analizado en un entorno SIG que permitiera introducir múltiples capas de información espacial. Por un lado ha sido necesario llevar cabo una interpolación de la información climática disponible en el espacio. Para ello se ha contado con datos pluviométricos diarios de 255 observatorios y datos termométricos (temperaturas máximas, mínimas y medias) de 164 observatorios en el periodo 1985-2000. Las series climáticas no estaban completas en su totalidad y presentaban algunas lagunas mensuales, aunque esto no revistió ningún problema para el proceso posterior.

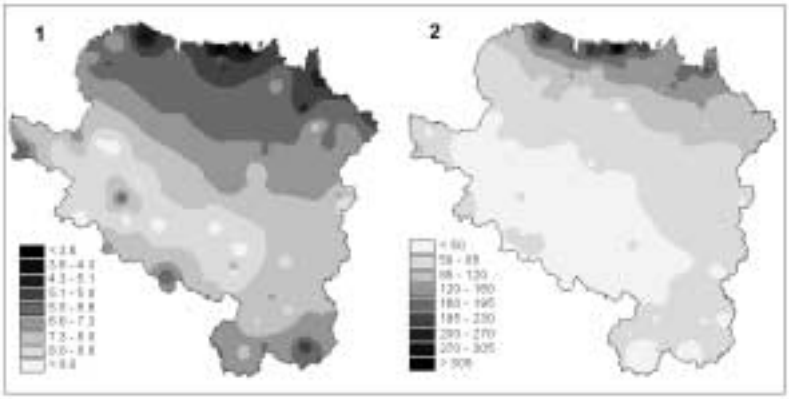
Se han obtenido superficies continuas de temperatura y precipitación a la misma resolución espacial de las imágenes NOAA-AVHRR, para cada uno de los meses. Para ello se han utilizado métodos de interpolación local (splines con tensión) con el objetivo de obtener una serie temporal climática en cada uno de los píxeles y poder relacionar los valores de NDVI con los de las variables climáticas, de forma espacial, y temporalmente continua.

Debido a la elevada densidad de observatorios disponibles se ha podido obtener una resolución detallada de la variación espacial de cada variable en cada uno de los meses analizados. El resultado fueron diferentes cartografías digitales continuas mensuales entre enero de 1986 y diciembre de 2000 de precipitaciones, temperaturas medias, máximas y mínimas, donde en cada uno de los píxeles de 1 x 1 km, correspondientes a la superficie de las imágenes NOAA-AVHRR, se pudo obtener una serie temporal mensual de cada una de las variables climáticas, lo que nos permitía, posteriormente, realizar análisis de correlación temporal, y determinar el papel diferencial de las

distintas variables climáticas en el espacio. En la figura 35 se muestra un ejemplo de cartografía de precipitaciones y otro de temperaturas.

figura 35

EJEMPLO DEL PROCESO DE INTERPOLACIÓN DE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS. 1: TEMPERATURAS MEDIAS DE ENERO DE 1995. 2: PRECIPITACIONES TOTALES DE ENERO DE 1997.



Una vez obtenidas las cartografías de precipitaciones y temperaturas (medias, máximas y mínimas) se procedió a realizar los cálculos de ETP, así como un balance hídrico del suelo exclusivamente climático.

Los modelos teóricos de balance hídrico del suelo pueden resultar de enorme complejidad e integrar, además de datos climáticos, información sobre el tipo de suelo y su capacidad de retención de agua, medidas de drenaje, escorrentía superficial, usos del suelo, tamaño de las raíces de la vegetación, perfiles edáficos, conductividad del suelo, etc. (Evans *et al.,* 1999; Rana y Katerji, 2000; Zierl, 2001). Sin embargo, buena parte de esta información se obtiene de forma muy aproximada incluso en espacios puntuales, por lo que la complejidad se incrementa considerablemente en superficies continuas donde la diversidad geográfica y edáfica es muy alta.

En el sector central del valle del Ebro, Seeger (2001) aplicó, con buenos resultados, un análisis climático del balance hídrico del suelo para analizar la dinámica de la humedad del suelo en espacios de baja cobertura vegetal. Este autor señala que los valores de humedad del suelo medidos en campo, en estas áreas semiáridas, están muy relacionados con los valores teóricos obtenidos de un balance hídrico climático, siendo su

dinámica temporal comparable. Tanto la infiltración como la escorrentía del agua procedente de las precipitaciones es escasa y las pérdidas de agua del suelo están condicionadas, fundamentalmente, por la evapotranspiración. Ascaso (1997) obtuvo resultados deficientes incluyendo en un modelo de balance hídrico del suelo estimaciones de escorrentía a partir de las precipitaciones en el valle del Ebro, concluyendo que es mejor la utilización exclusiva de modelos climáticos para este tipo de cálculos.

Por todo ello, para el cálculo del balance hídrico del suelo se consideró exclusivamente información climática. Hay que tener en cuenta que el interés de estos cálculos es determinar la evolución temporal de este parámetro, a fin de compararlo con la evolución del NDVI. De este modo los factores geográficos son estáticos en el tiempo, por lo que el peso fundamental de la variabilidad temporal en las condiciones hídricas se deberá a la evolución de los factores climáticos.

El cálculo del balance hídrico climático fue planteado inicialmente por Thornthwaite (1948), y se basa en la siguiente expresión:

$$B_n = B_{n-1} + P_n - ETP_n$$

Donde B es el balance hídrico

P es la precipitación mensual

ETP es la evapotranspiración potencial

n hace referencia al mes correspondiente

El paso inicial es realizar un cálculo de la ETP, que por si misma ya puede resultar importante como factor climático en la explicación del NDVI. La evapotranspiración controla un buen número de procesos meteorológicos e hidrológicos; aunque es extremadamente difícil obtener correctas estimaciones de evapotranspiración a escala regional, ya que se trata de un parámetro muy dependiente de las condiciones del suelo y de la fisiología de las plantas. Por ello, se ha introducido el concepto de evapotranspiración potencial (Doorenbos y Pruitt, 1976), que no depende de factores edáficos o de vegetación, sino que esencialmente depende de factores climáticos. La ETP se definiría como la evapotranspiración que ocurre cuando el suelo está completamente cubierto de vegetación activa bajo condiciones de no limitación hídrica.

Se han planteado diferentes métodos para el cálculo de la evapotranspiración (Sánchez-Toribio, 1992), siendo el de Pennman-Montheith (Allen *et al.*, 1998) considera-

do de referencia debido a su gran fiabilidad, ya que utiliza múltiples parámetros en su cálculo (temperatura, velocidad del viento, presión del aire,...). Sin embargo, dado que este método necesita de un gran número de parámetros para el cálculo de la ETP, y que éstos únicamente están disponibles en escasas estaciones meteorológicas, se han desarrollado otros métodos que precisan de menor cantidad de información (Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle,...).

A pesar de que se trata del método más utilizado y de más sencillo cálculo, el método de Thornthwaite no es adecuado para el cálculo de la ETP en ámbitos semiáridos debido a la elevada subestimación que produce (Jensen *et al.,* 1990; Kumar *et al.,* 1987), ya que el método considera que las tasas de evapotranspiración no están afectadas por la advección de aire húmedo o seco y que el cociente existente entre la energía que se utiliza en el proceso y aquella consumida en calentar el aire permanece constante (Martínez-Cob, 2002).

La FAO recomienda utilizar el método de Hargreaves (Hargreaves *et al.,* 1985; Hargreaves, 1985; Allen *et al.,* 1998) en este tipo de climas cuando no se dispone de otro tipo de información que la térmica (se precisa de temperaturas máximas y mínimas medias mensuales y temperaturas medias, además de radiación solar potencial en mm/día medios mensuales).

Este método ha sido testado en diferentes trabajos. Por ejemplo, Hargreaves y Allen (2003) han comprobado que la relación entre la ETP, estimada mediante el método de Hargreaves, y la realmente medida mediante lisímetro oscila entre 0.97 y 1.01 en diferentes regiones semiáridas y subhúmedas de EE.UU., con la única limitación de no ser un buen indicador para el cálculo de la ETP para periodos inferiores a 5 días.

En nuestro ámbito de estudio, Martínez-Cob (2002) muestra como el método de Hargreaves estima de forma más adecuada que el de Thornthwaite la ETP en el valle del Ebro y se ajusta de forma excelente a los valores obtenidos mediante el método de referencia de Penman-Monteith, con errores relativos inferiores al 10 %, mientras que el método de Thornthwaite indica errores de más del 30 %. López-Moreno *et al.* (2003) también utilizan este método en el Pirineo aragonés, mostrando como en condiciones climáticas de menor aridez y estrés hídrico también presenta valores muy ajustados a los que ofrece Penman-Monteith.

Por estas razones, en este trabajo se ha utilizado el método de Hargreaves para estimar la ETP mensual de forma espacialmente continua entre 1986 y 2000. Con este método la ETP media mensual se calcula de acuerdo a la expresión (Allen *et al.,* 1998):

$$ETP = 0.0023 \cdot R_a \cdot TD^{0.5} \cdot (Tm + 17.8)$$

Donde R_a es la radiación extraterrestre en mm/día calculada según Allen *et al*. (1998) en función de la latitud y el mes.

TD es la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas (medias mensuales) en ºC.

Tm es la temperatura media mensual.

La expresión del cálculo de ETP según Hargreaves se realiza a partir de los datos puntuales de observatorios. Sin embargo, ya que el objetivo es disponer de datos de ETP de forma espacialmente continua, para ser relacionados con los datos continuos de NDVI, se optó por realizar los cálculos a partir de las cartografías obtenidas mediante la interpolación de temperaturas máximas, mínimas y medias, y mediante cartografías continuas de radiación solar potencial, siguiendo el planteamiento de Droogers y Allen (2002) a escala global y, tal como señalan estos autores, se asume que los errores en los procesos de interpolación de las temperaturas son aleatorios y no sistemáticos.

Un problema fundamental radica en el cálculo de la radiación extraterrestre media mensual en mm/día. En el cálculo de la ecuación de Hargreaves se asume que la radiación potencial corresponde a una superficie llana en la que el relieve no ejerce ninguna influencia (Allen *et al.,* 1998). Sin embargo, el sector central del valle del Ebro presenta accidentes topográficos (en algunos casos notables como el macizo del Moncayo o las estribaciones prepirenaicas), dando lugar a sombras topográficas que afectan en la incidencia de radiación solar, y determinando, por tanto, las estimaciones finales de ETP. Cuando queremos realizar las estimaciones de ETP de forma continua en un entorno SIG mediante álgebra de capas, y no mediante los datos puntuales en diferentes observatorios, es necesario contar con la diferenciación que introduce el relieve.

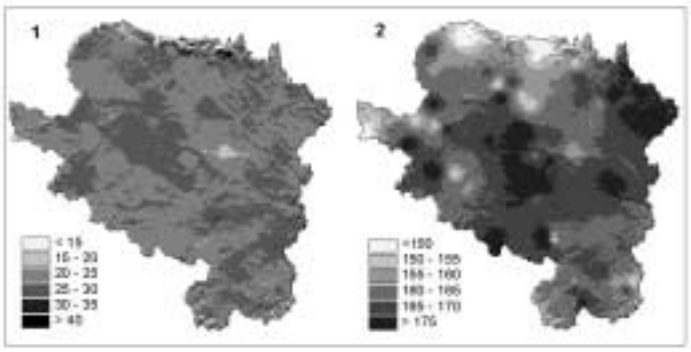
Para una representación continua de la radiación solar extraterrestre resulta más adecuado realizar los cálculos a partir de un modelo digital de elevaciones, teniendo en cuenta el ángulo de incidencia solar respecto a la superficie, y también considerando las sombras topográficas que introducen los relieves circundantes. Partiendo del MDE disponible a una resolución de 1 km se utilizó el SIG MiraMon para calcular la radiación mensual media de cada punto (Pons, 1997). Una vez obtenidas las coberturas continuas

para cada mes del año en J m^{-2} $día^{-1}$, éstas se convirtieron en mm (Allen *et al.,* 1998): 1 $MJm^{-2}día^{-1}$ = 0.408 mm $día^{-1}$.

Tras calcular las coberturas de temperaturas y radiación se realizó el cálculo de ETP, en un entorno SIG, mediante la aplicación de la formulación planteada por Hargreaves. De esta forma se disponía de un valor mensual de ETP continuo en todo el área de estudio. En la figura 36 se presenta un ejemplo del mes de enero de 1997 y otro de agosto de 2000. Como se puede apreciar, en el caso invernal, la ETP se encuentra muy condicionada por el relieve, ya que el ángulo de incidencia del sol es muy bajo en esa época del año y las temperaturas son bajas. La ETP estará determinada fundamentalmente por la cantidad de radiación que llegue al suelo. En verano, el mayor ángulo de incidencia solar supone que el relieve tenga menor importancia, por lo que las diferencias espaciales estarán condicionadas por las temperaturas registradas en cada observatorio.

figura 36

ETP ESTIMADA MEDIANTE EL MÉTODO DE HARGREAVES. 1- ENERO DE 1997, 2- AGOSTO DE 2000.



A partir de las coberturas de ETP, y las de precipitación mensual de cada uno de los meses, desde enero de 1986 hasta diciembre de 2000, se calculó un balance hídrico en el entorno SIG, según la formulación de Thornthwaite (1948). De esta forma se obtuvo un balance hídrico para cada mes de la serie de forma continua temporal y espacialmente en cada uno de los píxeles de 1 km.

El problema de este balance resultante es que de forma crónica en el sector central del valle del Ebro se produce un déficit anual de entre 700 u 800 mm según los diferentes sectores (Cuadrat, 1999). Por esta razón, la evolución temporal de los balances no es representativa temporalmente, ya que registra un descenso continuo del contenido de agua en el suelo con el tiempo.

Para evitar este problema, se han ajustado modelos empíricos de forma precisa a partir de las series temporales de cada píxel de 1 x 1 km, trabajando con los residuales resultantes en cada caso. La utilidad de esta metodología para eliminar las tendencias temporales en las series de datos climáticos ha sido puesta de manifiesto por Beguería *et al.* (2003) en el análisis de las tendencias de los recursos hídricos en el Pirineo aragonés.

La figura 37 ilustra el proceso en un píxel seleccionado al azar. En la figura A se muestra la evolución del balance hídrico mensual aplicando la formulación de Thornthwaite. Se aprecia el descenso progresivo conforme avanzan los meses de la serie, de tal forma que al llegar a diciembre del año 2000 existe un déficit desde 1986 de casi 12000 mm. Para evitar este problema se ajustó un modelo de regresión, en cada uno de los píxeles del área de estudio, entre el balance hídrico y la serie temporal en meses. En todos los casos los modelos fueron significativos $p < 0.001$.

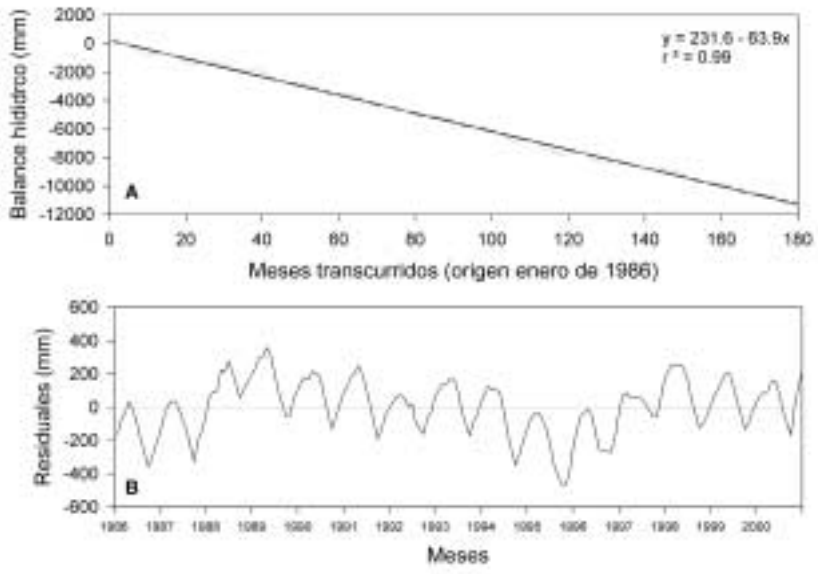
Mediante el cálculo de los residuales (datos calculados mediante el balance hídrico - estimados por el modelo empírico) se obtuvo una visión real y relativa del balance hídrico en cada uno de los meses de la serie temporal. Las series de residuales se obtuvieron, de nuevo, de forma espacialmente continua para todo el área de estudio. En la figura B se muestran los residuales obtenidos respecto al modelo planteado en la figura A. Se aprecian, pues, los diferentes ciclos anuales, con máximos en la reserva de agua en invierno y mínimos en agosto, y se pueden reconocer los periodos más deficitarios o excedentarios en el píxel considerado. En este caso los veranos de 1994 a 1996.

En la figura 38 se muestra un ejemplo final de balance hídrico en el mes de agosto de 1995. En la figura 1 se indica la distribución espacial del balance hídrico sin eliminar la tendencia temporal en las series de datos. En la figura 2 se muestra la distribución considerando los residuales. En el primer caso se aprecia el mayor déficit natural del sector centro-oriental, ya que es en este sector donde la acumulación de déficits anuales es superior. En cambio, la figura 2 muestra una situación concreta donde el déficit fue superior en el sector noroccidental. Las diferencias son, pues, significativas tanto en los valores absolutos de balance hídrico registrados, como en la distribución espacial de los mismos.

El resultado de todo este proceso metodológico han sido 168 cartografías continuas (una para cada mes entre enero de 1987 y diciembre de 2000) de precipitaciones, temperaturas medias, ETP y balance hídrico, con una resolución espacial de 1 x 1 km, cuya extensión superficial coincide con la de la serie de imágenes NDVI. Para relacionar ambas informaciones se utilizaron análisis de correlación entre las series temporales de NDVI y las de las diferentes variables climáticas.

figura 37

MODELO DE BALANCE HÍDRICO PARA UN PÍXEL CONCRETO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (A). EN LA FIGURA B SE MUESTRAN LOS RESIDUALES RESULTANTES DEL MODELO OBTENIDO, QUE SE PUEDEN CONSIDERAR COMO EL BALANCE HÍDRICO REAL RESPECTO A UNAS CONDICIONES MEDIAS.



En nuestro caso, el número de registros en las series temporales continuas (159 datos debido a la ausencia de información de NDVI entre septiembre de 1991 y agosto de 1992) permite garantizar la robustez de los resultados. Inicialmente se testó si la relación entre las diferentes variables climáticas y el NDVI resultaban lineales y aconsejaban utilizar un coeficiente de regresión paramétrico. Como se comprobará a lo largo del capí-

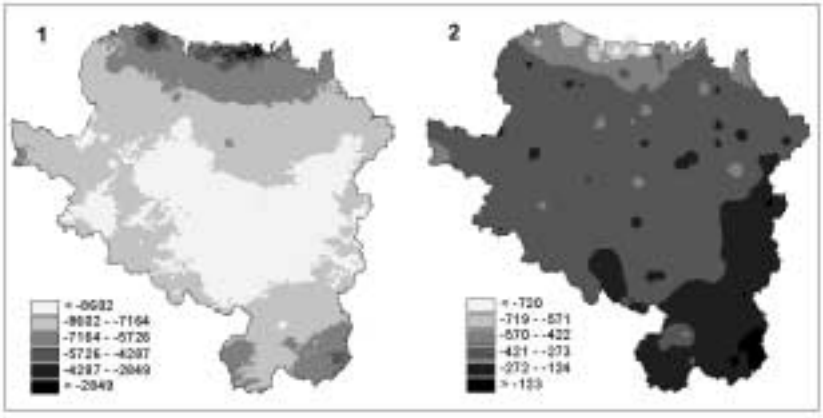
tulo, las relaciones resultan lineales en la mayor parte de los casos, lo que aconsejaba la utilización de este tipo de coeficiente.

Algunos autores, sin embargo, han comprobado que el NDVI no es sensible a grandes variaciones de precipitación, lo que produce que la relación deje de ser lineal para convertirse en log-lineal a partir de un determinado umbral. En la región ecuatorial africana el límite mensual de precipitación a partir del que es insensible el NDVI es de 200 mm/mes (Poccard y Richard, 1996), en el este de África el límite está en 1200 mm/año (Nicholson *et al.,* 1990) y en Brasil en 100 mm/mes (Santos y Negrín, 1997). En la mayor parte del sector central del valle del Ebro no se registran dichas precipitaciones anuales, por lo que no es de esperar que se produzcan saturaciones en la relación NDVI-precipitación a partir de determinados umbrales.

Los análisis de correlación se realizaron de forma continua en el espacio (píxel por píxel), pero también se realizó una agregación espacial considerando los principales usos del suelo y la totalidad de píxeles del área de estudio. A continuación se muestran los resultados considerando las series continuas, tanto las de NDVI como las de diferentes variables climáticas.

figura 38

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL BALANCE HÍDRICO. AGOSTO DE 1995. 1- RESULTADO ORIGINAL. 2- DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUALES EN LOS DIFERENTES MODELOS.

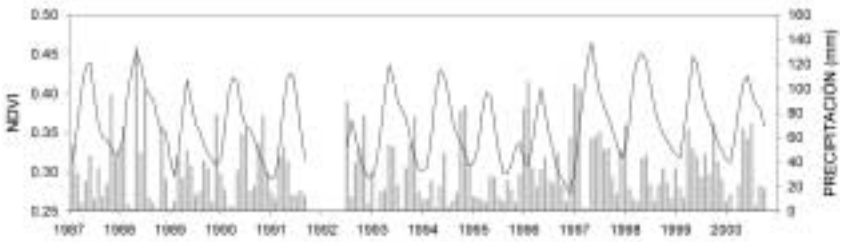


6.2. análisis mensual

En la figura 39 se muestra la evolución de las precipitaciones y del NDVI en el conjunto del área de estudio (promedio de todos los píxeles). No se observa una clara estacionalidad pluviométrica que explique los importantes contrastes estacionales que tienen lugar en la serie de NDVI. No existe una relación directa entre valores elevados de NDVI y de precipitaciones. Igualmente, las diferencias interanuales tampoco parecen ser reflejo de claras diferencias pluviométricas, aunque a esta escala temporal de análisis es difícil obtener conclusiones significativas en este sentido.

figura 39

EVOLUCIÓN TEMPORAL MENSUAL DE LAS PRECIPITACIONES Y DEL NDVI (LÍNEA NEGRA). PROMEDIO DE TODO EL ÁREA DE ESTUDIO (1987-2000)



En el caso de la evolución térmica (Figura 40), sí que existe una clara estacionalidad (verano-invierno), aunque no existe una coincidencia con el pico promedio de actividad vegetal (NDVI) en el sector central del valle del Ebro, que no se produce en verano sino en primavera. El comportamiento es similar en el caso de la ETP (Figura 41), fundamentalmente dependiente de las condiciones térmicas.

figura 40

EVOLUCIÓN TEMPORAL MENSUAL DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS Y DEL NDVI (LÍNEA NEGRA). PROMEDIO DE TODO EL ÁREA DE ESTUDIO (1987-2000)

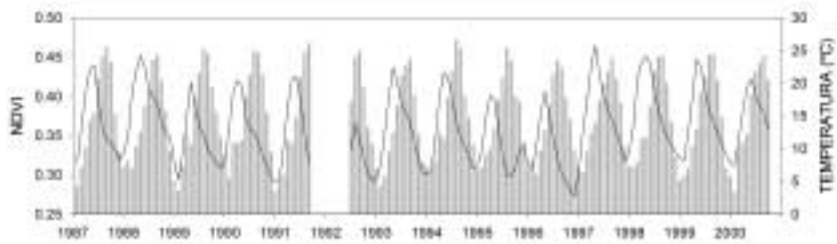
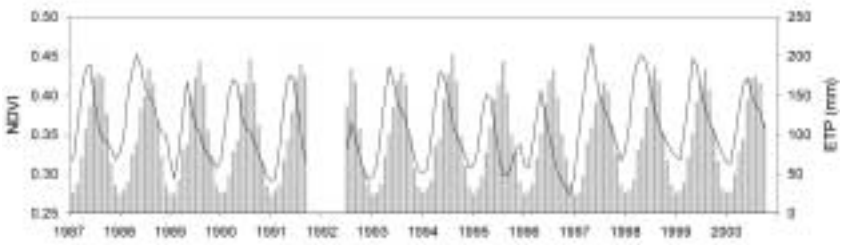


figura 41

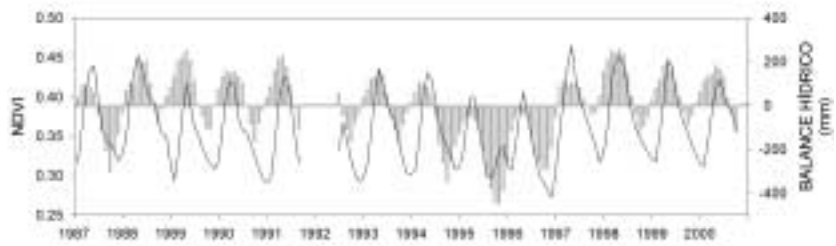
EVOLUCIÓN TEMPORAL MENSUAL DE LA ETP Y DEL NDVI (LÍNEA NEGRA). PROMEDIO DE TODO EL ÁREA DE ESTUDIO (1987-2000)



Sin embargo, al analizar la relación existente entre NDVI y balance hídrico en el conjunto del área de estudio observamos que se produce una relación mayor que la encontrada con el resto de variables climáticas (Figura 42). Los máximos anuales en las condiciones hídricas del suelo coinciden con el máximo de actividad vegetal, que tiene lugar, en promedio, durante los meses primaverales. Sin embargo, también es de destacar una gran coincidencia con relación a las diferencias interanuales en las series temporales. Los años de mayor actividad vegetal (1997-2000) coinciden con años en los que el balance hídrico del suelo resultó positivo en la estación primaveral, mientras que entre los años 1994 y 1996 los máximos de actividad primaveral presentan bajos valores, que coinciden con balances negativos.

figura 42

EVOLUCIÓN TEMPORAL MENSUAL DEL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO Y DEL NDVI. PROMEDIO DE TODO EL ÁREA DE ESTUDIO (1987-2000)



Así pues, considerando la totalidad del área de estudio y las series mensuales continuas, la evolución del NDVI, tanto en su dinámica estacional, como en las diferencias interanuales, parece más determinado por las condiciones de balance hídrico del suelo que por la cantidad mensual de precipitaciones o por los valores de ETP.

En la figura 43 se muestran los diagramas de dispersión que relacionan los valores mensuales de NDVI y los de las cuatro variables climáticas consideradas a partir de los valores promedio de la totalidad del área de estudio. En los cuatro casos se produce una relación positiva, pero la magnitud de las correlaciones es muy contrastada. La correlación entre la evolución temporal de precipitaciones mensuales y NDVI no es significativa ($r = 0.008$), pero en el caso de las temperaturas la correlación es significativa ($r = 0.17$, $p < 0.05$), aunque es mayor la correlación entre ETP y NDVI ($r = 0.36$ $p < 0.01$). No obstante, es en el caso del balance hídrico del suelo, donde la correlación resulta ser más robusta ($r = 0.58$, $p < 0.01$).

La representación espacial de estas correlaciones, considerando la información píxel a píxel, permite determinar importantes contrastes espaciales en la influencia de las distintas variables climáticas sobre las series continuas de NDVI (Figura 44). En el caso de las precipitaciones son escasas las áreas en las que existen correlaciones significativas entre ambas series temporales mensuales, y en ningún caso son muy representativas. Únicamente en las áreas de secanos, matorrales y pastizales del sector suroccidental (campos de Borja y Tarazona, además de Cariñena) se producen correlaciones significativas, aunque poco robustas.

En el caso de las temperaturas y la ETP se producen significativas correlaciones en las áreas de regadíos y en las zonas de bosques de frondosas y bosques mixtos en el Somontano de Huesca y en el sector prepirenaico. Las correlaciones en estas áreas son muy robustas, con valores superiores a 0.6 en todos los casos. La diferenciación espacial es muy nítida, pudiendo reconocerse incluso las áreas de pequeños regadíos en los pequeños valles, en los que la correlación es superior a la de las áreas circundantes, extendiéndose manchas longitudinales de mayor correlación que coinciden con el curso de los ríos. Las correlaciones son más elevadas con la ETP que con la temperatura, incrementándose, además, el número de áreas que presentan valores de correlación significativos. La diferenciación espacial entre unas áreas y otras también es muy clara. La dinámica temporal del NDVI en los bosques de coníferas del centro de la depresión (Zuera y Alcubierre) muestra una correlación significativa con la dinámica

temporal de la ETP, aunque dicha correlación es inferior que en las masas boscosas del Prepirineo o en las del macizo del Moncayo.

Finalmente, la representación cartográfica de valores de correlación entre las series de balance hídrico y las de NDVI muestra una imagen que podría considerarse como un negativo fotográfico de la representada por la ETP. En este caso, las áreas con correlaciones positivas y significativas corresponden a las áreas de matorrales y pastizales, siendo más robusta la correlación en las zonas centrales del valle. En algunas áreas de regadíos y de bosques de frondosas y mixtos la correlación es también significativa, pero mucho menos robusta que la indicada con la ETP. En todas las áreas de secanos, matorrales y pastizales del sector central del valle los valores de correlación son signifi-

figura 43

DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN ENTRE LOS VALORES MENSUALES DE NDVI, PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA, ETP Y BALANCE HÍDRICO EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO.

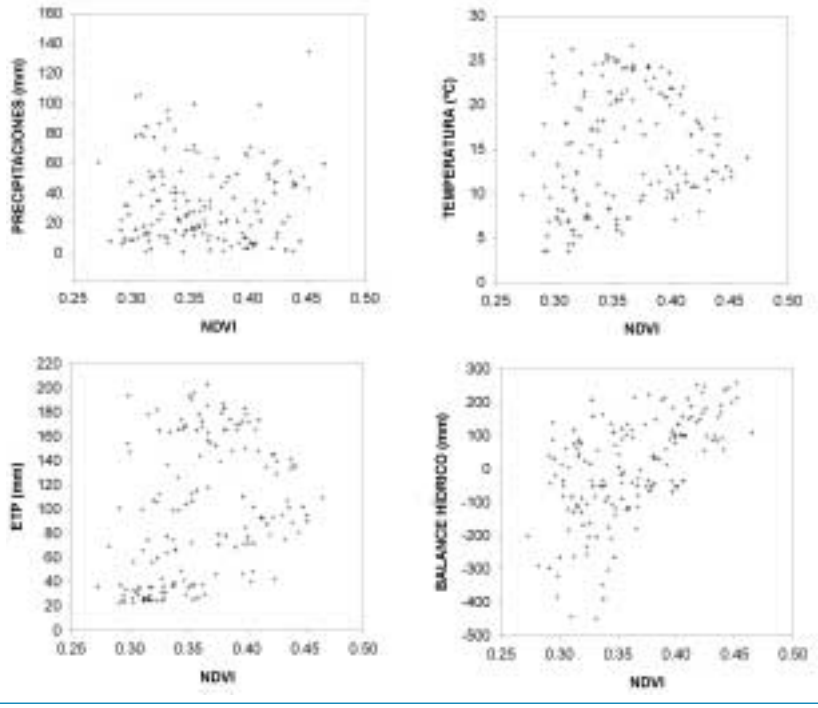
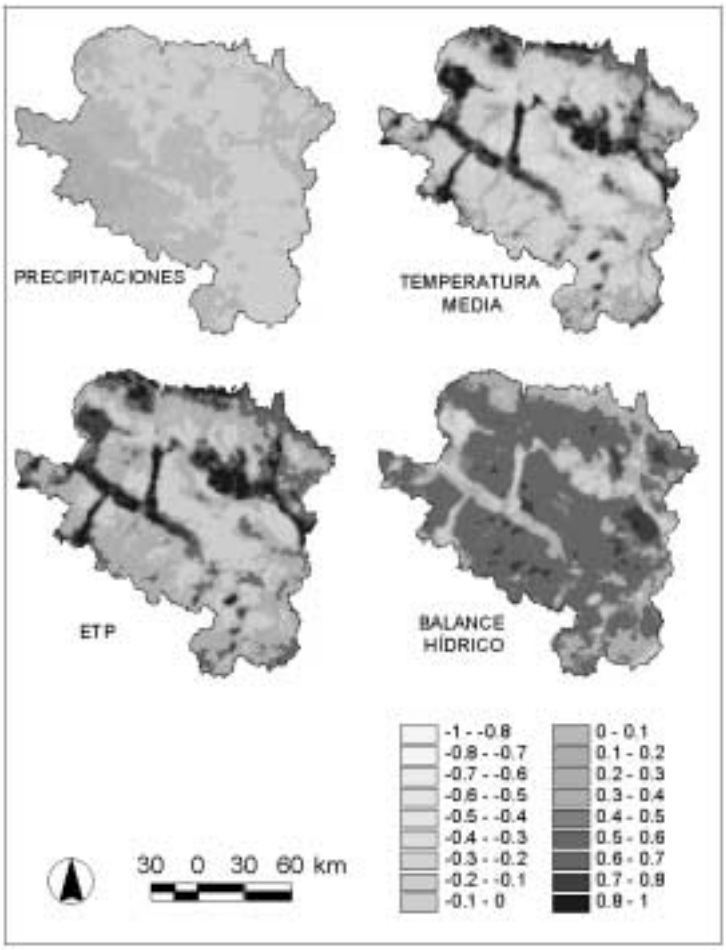


figura 44

VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DE NDVI EN CADA UNO DE LOS PÍXELES DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LAS SERIES TEMPORALES DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS OBTENIDAS MEDIANTE INTERPOLACIÓN ESPACIAL: PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA MEDIA, ETP Y BALANCE HÍDRICO. LOS VALORES SIGNIFICATIVOS SE CORRESPONDEN CON: $P < 0.01$, $R = \pm 0.2$.



cativos y superiores a 0.5. Incluso en las áreas de bosques de coníferas del sector central del valle las correlaciones son superiores a las que se han indicado entre NDVI y ETP.

Se ha comprobado que la evolución temporal y, sobre todo, la respuesta de los diferentes cultivos y formaciones vegetales naturales ante diferentes factores climáticos varía considerablemente, pero no sólo entre usos del suelo diferentes, sino que en función de la ubicación dentro del valle las diferencias son muy notables.

6.3. Influencia de las variables climáticas sobre las diferencias interanuales del NDVI: análisis estacional y anual

La comparación interanual del NDVI y su relación con aspectos de carácter climático ha sido abordada por diferentes autores. Nicholson *et al.* (1990) indican que el promedio del NDVI integrado anual está linealmente relacionado con las precipitaciones medias en el Sahel. Igualmente, Millington *et al.* (1994) analizaron la evolución de los índices de vegetación en Pakistán entre 1981 y 1987, comprobando que los años de sequía se produce un importante descenso de la magnitud de las curvas anuales de NDVI.

También se ha comprobado que la vulnerabilidad de las diferentes formaciones vegetales varía en función de sus características fisiológicas y su localización geográfica. La asociación entre precipitaciones y NDVI puede ser diferente entre las formaciones vegetales ya que los distintos tipos de vegetación difieren en la ratio de crecimiento o en la producción primaria por unidad de lluvia, aspecto que cambia la eficacia en el uso del agua y, por tanto, la vulnerabilidad (Le Houerou, 1984). Farrar *et al.* (1994) han mostrado que la eficacia en el uso del agua por parte de la vegetación depende principalmente del tipo de suelo y formación vegetal existente, mientras que Richard y Poccard (1998) señalan el mayor peso de las condiciones climáticas medias y del tipo de vegetación. La mayor eficacia se localiza en las formaciones vegetales de los ecosistemas más áridos, donde la vegetación debe hacer un uso eficiente de la poca cantidad de agua disponible para sobrevivir.

Ya que los valores integrados anuales del NDVI (ΣNDVI) están altamente relacionados con la producción total de biomasa, se trata de una escala temporal de agre-

gación adecuada para analizar la influencia de los distintos factores climáticos (precipitación, ETP y balance hídrico) sobre la producción vegetal anual en los diferentes usos y comunidades vegetales. Los valores integrados se encuentran agregados en forma de años agrícolas (septiembre – agosto), por lo que la agregación de las diferentes variables climáticas (precipitación, ETP y balance hídrico) se realizó a partir del promedio de los diferentes meses, también considerando una escala de agregación de años agrícolas.

En la figura 45 se muestran los coeficientes de correlación entre los valores anuales de ΣNDVI, y los de las variables precipitación, balance hídrico y ETP agregados en todos los casos en datos anuales, considerando un criterio de años agrícolas. Las correlaciones se realizan píxel a píxel partir de 12 registros anuales (1988 –2000, exceptuando 1992). Los patrones espaciales de asociación entre las variables climáticas y la producción vegetal anual son muy claros en los tres casos.

Las correlaciones con los valores de balance hídrico anual son más altas en las áreas septentrionales, en los bosques de coníferas del sector central del valle (montes de Zuera y sierra de Alcubierre) y en amplios sectores del somontano de la Cordillera Ibérica, donde se localizan bosques de frondosas y coníferas. En estos espacios se registran correlaciones superiores a 0.8. En el centro del valle amplias áreas muestran valores significativos de correlación.

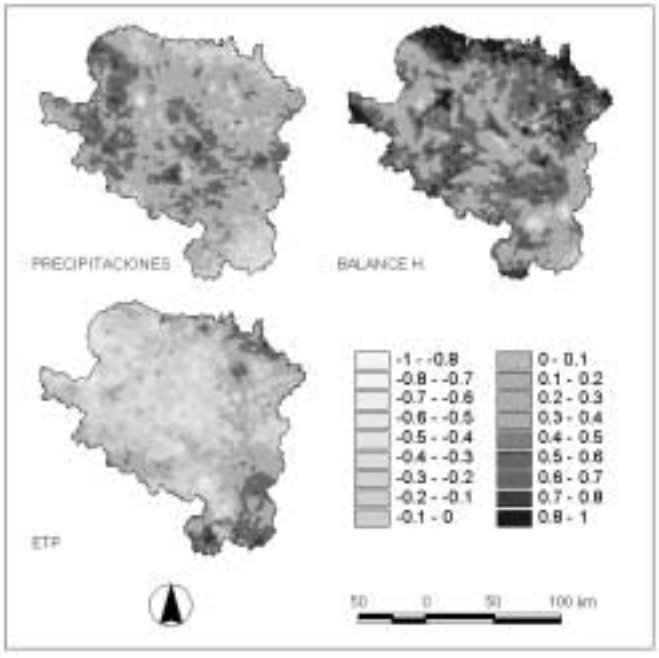
En el caso de las precipitaciones, las correlaciones son menos robustas, y en ningún caso superan coeficientes de 0.7. Las áreas con correlaciones significativas se restringen, principalmente, en espacios del centro del valle que corresponden, en su mayor parte, a áreas de matorrales y pastizales. Estas áreas coinciden con los espacios en los que la correlación entre el ΣNDVI y las series de balance hídrico del suelo no resultan significativas.

Finalmente, las correlaciones significativas entre los valores anuales de ETP y de ΣNDVI se reducen a escasas áreas de los sectores sudoriental y nororiental donde, como hemos comprobado al analizar los perfiles particulares de matorrales, bosques de coníferas y de frondosas se producía una escasa variabilidad, y donde los valores mensuales de balance hídrico no indicaban un papel significativo al explicar las diferencias interanuales en las series.

Es llamativo que aquellas áreas que presentan un menor control interanual por parte del balance hídrico del suelo (como los bosques del sector más septentrional o del centro del valle) presentan variaciones interanuales de los valores de ΣNDVI más condicionadas por los valores medios del balance hídrico del suelo que los espacios cuya dinámica anual sigue, en mayor medida, la evolución intranual de dicha variable. Estos espacios (sectores de cultivos de secano, matorrales y pastizales del centro del valle) muestran un mayor control de los valores anuales de ΣNDVI por parte de las precipitaciones anuales, aunque, en general, las correlaciones son inferiores que las observadas con el balance hídrico del suelo.

figura 45

CORRELACIÓN PÍXEL A PÍXEL ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DE ΣNDVI Y LAS DE ETP, PRECIPITACIONES Y BALANCE HÍDRICO DEL SUELO AGREGADAS A ESCALA DE AÑOS AGRÍCOLAS. LAS CORRELACIONES SE HAN REALIZADO A PARTIR DE 12 REGISTROS. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE $P < 0.05$, SE FIJA EN 0.57.



La explicación a este hecho podría derivarse de las propias características intrínsecas de las formaciones vegetales, con diferentes sistemas radiculares, que permitirán la captación de agua a diferentes niveles. En el caso de los balances hídricos del suelo, se trata de un indicador con "memoria", en el que las condiciones climáticas de dos años anteriores siguen teniendo peso en el valor actual del indicador [se ha comprobado que la correlación entre los valores normalizados del balance hídrico del suelo y el índice SPI a la escala temporal de 24 meses es de $r = 0.73$, muy significativa ($p < 0.001$), pues se han considerado los valores mensuales continuos para su cómputo]. Digamos que unos bajos valores anuales de balance hídrico del suelo señalarán condiciones secas acumuladas durante el periodo del año en curso y el año anterior.

La vegetación herbácea y arbustiva (tanto natural como cultivada) presenta sistemas radiculares menos desarrollados que los de las especies arbóreas. Por esta razón tendrá menor capacidad para hacer frente a un año pluviométricamente seco, lo que explica la mayor correlación con los valores de precipitación media anual. Sin embargo, la vegetación arbórea podrá disponer de agua a mayor profundidad y reducir su vulnerabilidad respecto a un año seco. Será cuando se repitan los años secos cuando esta capacidad se vea mermada explicando, por tanto, la respuesta mayor ante los valores de balance hídrico del suelo.

En las llanuras centrales de EE.UU., Wang *et al.* (2003) han señalado que el valor de ΣNDVI no está condicionado únicamente por las precipitaciones de año, sino que, muestran que las precipitaciones de la segunda mitad del año anterior también influyen significativamente. Indican que aquellas especies perennes o que presentan sistemas radiculares profundos amortiguarán mejor las fluctuaciones climáticas que las especies anuales. Los bosques todavía amortiguarán más estas variaciones debido a unos más profundos sistemas radiculares, por lo que sus condiciones dependerán de fluctuaciones climáticas de baja frecuencia, mejor registradas a partir de los balances hídricos del suelo. Diferentes trabajos han comprobado que la respuesta de los bosques ante las condiciones hídricas es mayor considerando periodos de tiempo largos (Orwing y Abrams, 1997; Jonsson *et al.,* 2002), argumentando que estas comunidades vegetales podrán hacer frente a déficit hídricos de corta duración, mientras que los más duraderos podrán afectar a su estructura fisiológica y precisar de más años para recuperar su situación de crecimiento normal. Esto ha sido corroborado mediante la utilización de imágenes de satélite por Wang *et al.* (2003), que comprueban que las correlaciones varían significativamente en función de los usos del suelo. En el caso de los cultivos indican que el NDVI

responde más rápidamente a las precipitaciones que los bosques, que responderán a déficits más duraderos en el tiempo. Este aspecto está íntimamente relacionado con las estrategias adaptativas de la vegetación para hacer uso del agua de forma eficiente.

En cambio, en el caso de la vegetación herbácea y los cultivos, se ha comprobado una mayor respuesta ante las precipitaciones que se reciben en el año en curso, En el sector central del valle del Ebro, Austin *et al.* (1998) y McAneney y Arrúe (1993) han mostrado que el principal condicionante de las cosechas de cereal son las precipitaciones que se recogen a lo largo del año en curso y, especialmente, en los meses de noviembre a enero, abril y mayo.

En la tabla 11 se muestran las correlaciones mediante la agregación de los píxeles correspondientes a los usos más representativos dentro del área de estudio. Como se puede comprobar, únicamente se registran correlaciones significativas entre los valores de ΣNDVI y los promedios anuales de balance hídrico en determinados usos. La correlación entre precipitaciones y ΣNDVI, y entre ETP y ΣNDVI no es significativa en ninguno de los usos del suelo considerados de forma agregada, ya que, como hemos comprobado en la imagen total, la diversidad en los resultados de las correlaciones resulta muy importante incluso dentro de un mismo uso del suelo. Frente a ello, las áreas de vegetación natural (bosques de coníferas, frondosas y matorrales y pastizales) muestran robustas y significativas correlaciones con las condiciones de balance hídrico del suelo, por lo que, en general, se puede considerar como la variable que determina en mayor medida las diferencias interanuales en la productividad de estas cubiertas vegetales.

tabla 11

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE DIFERENTES VARIABLES CLIMÁTICAS AGREGADAS A ESCALA ANUAL. * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$), ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$).

usos del suelo	Precipitaciones	Balance hídrico	ETP
Secanos (herbáceas)	0.39	0.49	-0.12
Secanos (permanentes)	0.31	0.55	0.35
Regadíos	0.38	0.59*	-0.17
Frondosas	-0.02	0.87**	0.32
Coníferas	0.11	0.79**	0.18
Matorrales	0.29	0.70**	0.04

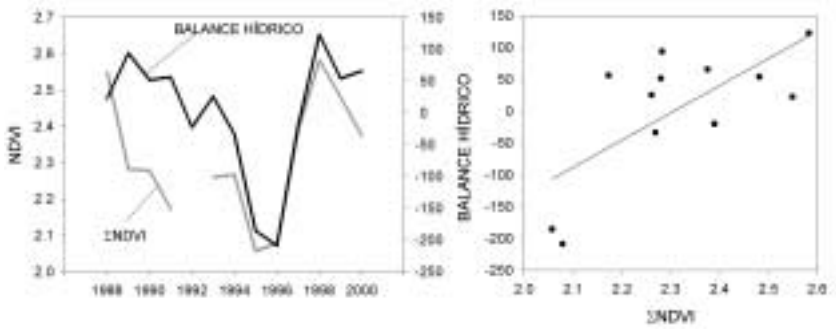
Para ilustrar estas relaciones espacio-temporales entre las variables climáticas consideradas y los valores anuales de ΣNDVI, en la figura 46 se muestra la evolución tem-

poral de los valores promedio de balance hídrico y ΣNDVI en las áreas de matorrales y pastizales, donde existe una clara coincidencia entre el descenso de la producción vegetal durante los años 1995 y 1996, y los más bajos niveles de balance hídrico. Entre 1997 y 1998, en cambio, se produce un importante repunte en la producción vegetal coincidiendo con valores positivos de balance hídrico.

A partir de los valores de correlación entre el ΣNDVI y los valores anuales promedio en cada una de las variables climáticas, se puede obtener una compartimentación espacial de acuerdo a las variables que influyen en mayor medida sobre la producción vegetal anual en diferentes formaciones vegetales.

figura 46

EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO Y DE LOS VALORES DE ΣNDVI EN LAS ÁREAS DE MATORRALES Y PASTIZALES.

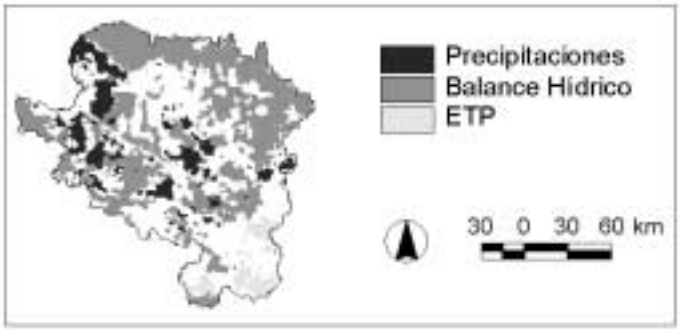


En la figura 47 se muestra una clasificación de las diferentes áreas de acuerdo a la variable climática que presenta una mayor correlación con la evolución interanual del ΣNDVI, siempre que dicha correlación sea significativa estadísticamente. La mayor parte del área de estudio presenta una mayor relación con los valores anuales medios de humedad del suelo, sobre todo en el área más septentrional y buena parte del sector central del valle. No obstante, se puede hablar de una importante compartimentación espacial en la que se observa que amplias áreas muestran una mayor respuesta a los valores anuales de precipitación que a los de balance hídrico del suelo. Además, estos espacios coinciden con las áreas de cultivos de secano de menor productividad de todo el sector central del valle del Ebro, en las que las precipitaciones anuales ejercen una significativa influencia sobre la producción final (Martí, 1992b; Alberto y Machín, 1978).

Finalmente, en el extremo sudoriental son las diferencias de ETP las que condicionan esencialmente la producción final de las formaciones vegetales que se localizan en este espacio, con una correlación positiva. Esto indica que los años con altas temperaturas medias serán favorables para una elevada actividad vegetal en estos espacios, lo que indirectamente determina que la disponibilidad de agua no resulta una limitación importante, y que las formaciones vegetal se encuentran muy adaptadas a las condiciones hídricas de este espacio, aunque tengan lugar importantes descensos pluviométricos.

figura 47

CLASIFICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DE ACUERDO A LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE MÁS INFLUYEN SOBRE LOS VALORES DE ΣNDVI. SÓLO SE HAN CONSIDERADO AQUELLOS PÍXELES EN LOS QUE EXISTEN CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($p < 0.05$). LOS ESPACIOS EN BLANCO NO MUESTRAN ASOCIACIÓN CON NINGUNA DE LAS VARIABLES CONSIDERADAS.



En la tabla 12 se muestra el porcentaje del área de estudio en el que las diferentes variables climáticas muestran una influencia significativa considerando las principales cubiertas del suelo. Las variaciones en el porcentaje de superficie correspondiente a correlaciones no significativas es muy importante en función del tipo de cubierta del suelo. En más de la mitad de las áreas ocupadas por cultivos herbáceos de secano no se registran correlaciones significativas entre la evolución interanual de las diferentes variables climáticas y la evolución del ΣNDVI. En el 25 % del área ocupada por estos cultivos se producen correlaciones significativas con los valores promedio de balance hídrico, y en el 19.5 % con los de precipitación, siendo el uso del suelo con mayor proporción de superficie en la influencia de esta variable climática. La diferenciación espacial, además,

resulta clara, ya que son los cultivos de secano ubicados en las zonas más áridas, y en los que las producciones vegetales son menores, los que muestran correlaciones significativas con la variabilidad interanual de las precipitaciones, mientras que en las áreas más septentrionales (cultivos de secano en la Hoya de Huesca) la correlación no es significativa.

tabla 12

PORCENTAJE DE SUPERFICIE OCUPADA POR LAS DIFERENTES CUBIERTAS DEL SUELO EN LAS QUE LOS MAYORES VALORES DE CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA CORRESPONDEN CON ALGUNA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.

Usos del suelo	No significativo	Precipitación	ETP	Balance H.
Cultivos de secano (herbáceas)	54.60%	19.56%	0.61%	25.18%
Cultivos de secano (permanentes)	45.27%	12.83%	6.08%	35.81%
Cultivos de regadío	49.26%	11.15%	0.43%	39.14%
Bosques de frondosas	13.17%	0.00%	12.28%	74.55%
Bosques de coníferas	31.32%	0.02%	9.90%	56.21%
Matorrales y pastizales	38.54%	9.04%	4.89%	47.50%

En los cultivos permanentes de secano las cifras son similares, aunque disminuye el porcentaje de correlaciones no significativas y aumentan las áreas en las que la correlación entre ΣNDVI y el balance hídrico promedio anual es significativa. Frente a ello, se reduce el porcentaje superficial con influencia de las precipitaciones.

En las áreas de vegetación natural (bosques, matorrales y pastizales) se incrementa el porcentaje de superficie con una significativa influencia de las variables climáticas sobre las diferencias interanuales en los valores de ΣNDVI, sobre todo en el caso de los bosques de frondosas, donde únicamente el 13.17 % del área que ocupa esta cubierta vegetal no presenta correlación alguna con las diferentes variables climáticas. La influencia de las diferencias interanuales en los valores de balance hídrico del suelo es muy alta en los tres casos, mostrando que más del 55 % de los bosques están afectados, de forma significativa, por la evolución interanual de esta variable.

A escala estacional la influencia de los diferentes factores climáticos puede variar. Por ejemplo, el papel de las precipitaciones y las condiciones hídricas del suelo variará según las condiciones térmicas. En primavera y verano las condiciones hídricas tendrán más importancia que en invierno, estación en la que debido a las bajas temperaturas la actividad vegetal es muy baja. El papel de las temperaturas y, por consiguiente, de la ETP, será también diferenciado en función de las fases fenológicas en las que se encuentra la vegetación. En invierno, valores térmicos altos favorecerán el desarrollo vegetal y poten-

ciarán la actividad vegetativa de las plantas. Sin embargo, en verano, unas elevadas temperaturas propiciarán un incremento del riesgo de estrés hídrico y, por lo tanto, un descenso de los valores de NDVI. A partir del promedio de los datos de NDVI y del promedio de las diferentes variables climáticas se ha comprobado la relación espacio-temporal a escala estacional, siguiendo el mismo procedimiento metodológico planteado en el análisis a escala anual.

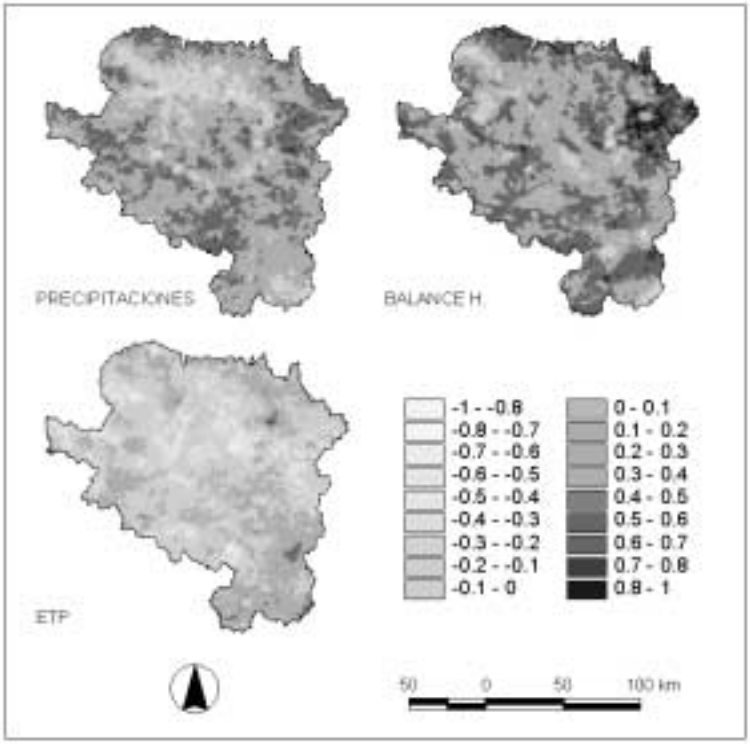
En la figura 48 se muestran las correlaciones entre los valores integrados de NDVI y los promedios de las variables climáticas en primavera (Mrz- Abr - My). Las correlaciones entre los valores de precipitación y los de NDVI muestran patrones espaciales diferenciados, con correlaciones positivas en la mayor parte del área de estudio y significativas en amplias áreas del sector central del valle. Sin embargo, y curiosamente, en un extenso sector de las Cinco Villas y de la Hoya de Huesca se registran incluso correlaciones negativas entre la actividad vegetal y las precipitaciones. Más extensa es el área afectada por las diferencias interanuales en los valores de balance hídrico del suelo, con correlaciones significativas en amplias áreas, tanto del norte, centro y sur del sector central del valle del Ebro. En cambio, en el caso de la ETP predominan las correlaciones negativas, y únicamente en el sector más meridional se registran valores positivos estadísticamente significativos.

Las precipitaciones estivales no tienen una influencia clara sobre la dinámica interanual del NDVI durante el verano. Únicamente se registran correlaciones estadísticamente significativas en algunas áreas del sector más occidental, donde predomina la vegetación herbácea y arbustiva (Figura 49). Frente a ello, la correlación entre el NDVI estival y los valores promedio de balance hídrico del suelo durante esta estación es más significativa en la mayor parte del área de estudio, con correlaciones positivas superiores a 0.8. El verano es la estación del año en la que de forma natural se registran acusadas condiciones de déficit hídrico en el sector central del valle del Ebro. Por ello resulta lógica esta mayor dependencia respecto al agua que se haya acumulado en los meses anteriores, ya que los veranos con mayores reservas permitirán un adecuado desarrollo y actividad vegetal dentro del área de estudio.

En el caso de la correlación entre el NDVI y la ETP medios en verano, se comprueba que existen significativas relaciones negativas en amplios espacios, donde unas elevadas tasas de ETP acentuarán las condiciones de estrés hídrico y limitarán el desarrollo de la vegetación. No obstante, en este caso tampoco se puede realizar una generalización espacial, ya que en aquellos espacios de mayor elevación (Prepirineo al norte y

figura 48

CORRELACIÓN PÍXEL A PÍXEL ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DEL NDVI INTEGRADO EN LOS MESES PRIMAVERALES Y LAS DE ETP, PRECIPITACIONES Y BALANCE HÍDRICO DEL SUELO PROMEDIO DURANTE LA MISMA ESTACIÓN. LAS CORRELACIONES SE HAN REALIZADO A PARTIR DE 13 REGISTROS. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.55.

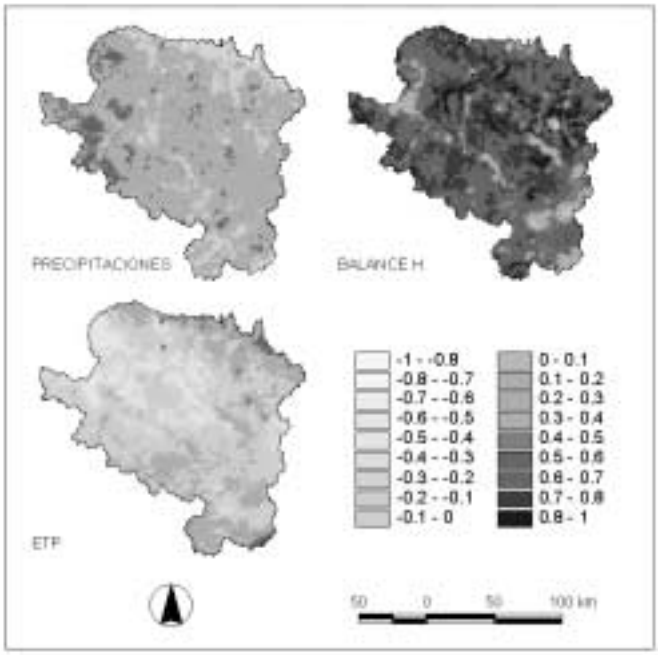


puertos de Beceite al sur), se registran correlaciones positivas. Las más bajas condiciones térmicas que registran de forma promedio estos espacios y las mayores disponibilidades de agua de estas áreas respecto al resto dan lugar a que superiores tasas de ETP puedan facilitar la actividad vegetal.

En otoño (Figura 50) comprobamos que la actividad vegetal no se encuentra influida por las precipitaciones que se registran durante esos meses y sí en mayor medi-

figura 49

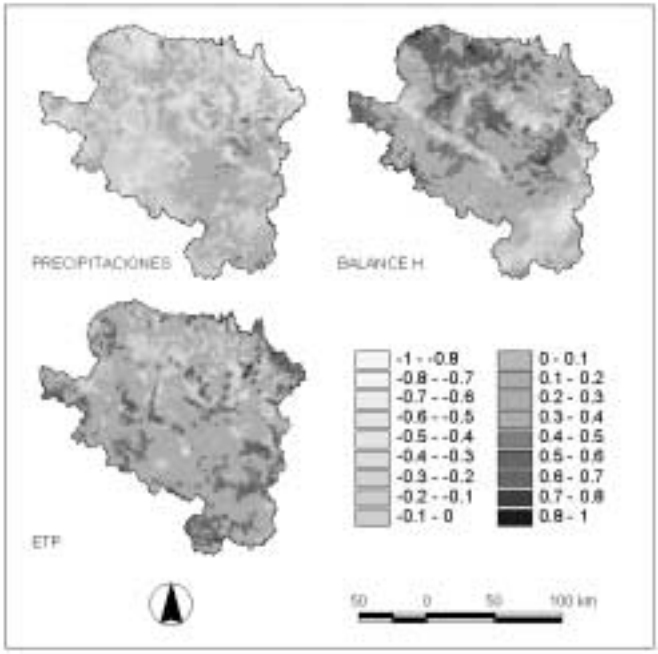
CORRELACIÓN PÍXEL A PÍXEL ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DEL NDVI INTEGRADO EN LOS MESES ESTIVALES Y LAS DE ETP, PRECIPITACIONES Y BALANCE HÍDRICO DEL SUELO PROMEDIO DURANTE LA MISMA ESTACIÓN. LAS CORRELACIONES SE HAN REALIZADO A PARTIR DE 13 REGISTROS. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.55.



da por el agua que permanece acumulada en el suelo o por los valores medios de ETP. Un adelantamiento de las condiciones frías terminará con los ciclos vegetativos de determinadas especies anuales, disminuirá la actividad en los regadíos, terminará con la actividad de los bosques de frondosas y ralentizará la de las coníferas, por lo que las bajas tasas de ETP (asociadas a bajas temperaturas) en otoño darán lugar a una menor actividad vegetal; al contrario de lo que sucedía en los meses estivales, donde las correlaciones con la ETP resultaban ser eminentemente negativas en amplios espacios del sector central del valle del Ebro.

figura 50

CORRELACIÓN PÍXEL A PÍXEL ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DEL NDVI INTEGRADO EN LOS MESES OTOÑALES Y LAS DE ETP, PRECIPITACIONES Y BALANCE HÍDRICO DEL SUELO PROMEDIO DURANTE LA MISMA ESTACIÓN. LAS CORRELACIONES SE HAN REALIZADO A PARTIR DE 13 REGISTROS. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.55.



Finalmente, en invierno se refuerza el peso de la ETP dentro de la explicación de las diferencias interanuales en la actividad vegetal (Figura 51). Mientras la influencia de las precipitaciones invernales sobre la actividad vegetal en esta estación se reduce a determinadas áreas de regadíos; y los balances hídricos influyen de forma positiva y significativa únicamente en las áreas de bosques del Prepirineo, montes de Zuera, Alcubierre y en el macizo del Moncayo; la influencia de la ETP sobre la actividad vegetal invernal comprende amplias áreas del sector meridional, donde altos valores de ETP favorecerán la actividad vegetal invernal en todo este espacio.

El análisis estacional considerando los principales usos del suelo del área de estudio matiza los resultados. La tabla 13 muestra los resultados del análisis de correlación entre los valores de precipitación y los de NDVI promedio en cada uno de los diferentes usos del suelo estacionalmente. Las correlaciones más altas se registran en primavera y verano, aunque en ningún caso son significativas estadísticamente, mientras que en otoño predominan correlaciones negativas. Así pues, el peso principal de las precipitaciones en los diferentes usos del suelo se producen en primavera y verano, momento en el que se registran las mayores necesidades de agua por parte de la vegetación.

figura 51

CORRELACIÓN PÍXEL A PÍXEL ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DEL NDVI INTEGRADO EN LOS MESES INVERNALES Y LAS DE ETP, PRECIPITACIONES Y BALANCE HÍDRICO DEL SUELO PROMEDIO DURANTE LA MISMA ESTACIÓN. LAS CORRELACIONES SE HAN REALIZADO A PARTIR DE 13 REGISTROS. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.55.

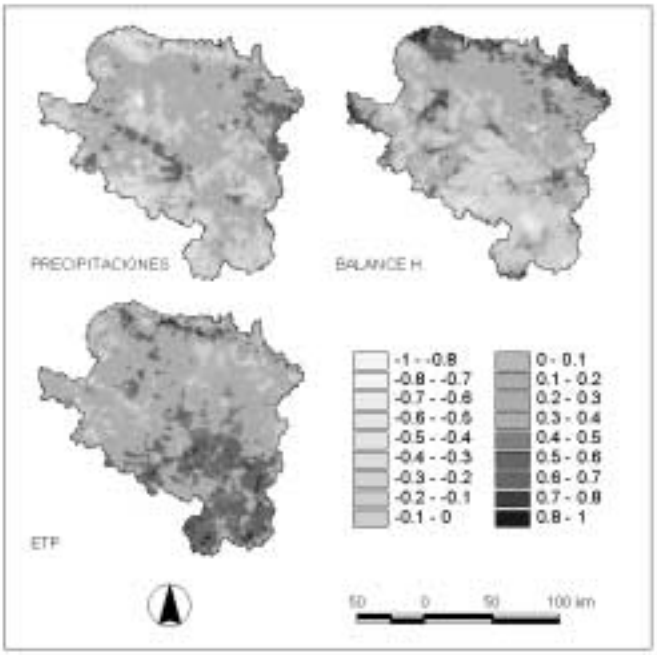


tabla 13

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES ESTACIONALES DE NDVI Y LOS DE PRECIPITACIONES EN LAS DIFERENTES ESTACIONES DEL AÑO. LOS ANÁLISIS SE REALIZAN A PARTIR DE LA AGREGACIÓN DE LA TOTALIDAD DE LOS PÍXELES DE CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO. * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$), ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$).

	Primavera	verano	Otoño	Invierno
Secanos (herbáceas)	0.30	0.25	0.01	0.18
Secano (permanentes)	0.38	0.43	-0.12	-0.01
Regadíos	0.43	0.27	-0.20	0.34
Frondosas	0.35	-0.06	-0.37	0.10
Coníferas	0.38	0.13	-0.24	0.02
Matorrales	0.41	0.22	-0.16	0.13

En la tabla 14 se muestran estas mismas correlaciones con las condiciones de balance hídrico del suelo. En este caso sí que se registran significativas correlaciones en primavera y verano (mucho más robustas en este último caso), mientras que en otoño e invierno el peso de las condiciones del balance hídrico del suelo sobre la actividad vegetal es muy inferior.

tabla 14

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES ESTACIONALES DE NDVI Y LOS DE BALANCE HÍDRICO EN LAS DIFERENTES ESTACIONES DEL AÑO. LOS ANÁLISIS SE REALIZAN A PARTIR DE LA AGREGACIÓN DE LA TOTALIDAD DE LOS PÍXELES DE CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO. * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$), ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$).

	Primavera	verano	Otoño	Invierno
Secanos (herbáceas)	0.37	0.75**	0.36	0.03
Secano (permanentes)	0.50	0.72**	0.30	0.05
Regadíos	0.64*	0.74**	0.17	0.15
Frondosas	0.66*	0.69**	0.33	0.52
Coníferas	0.66*	0.77**	0.36	0.44
Matorrales	0.56*	0.76**	0.34	0.30

En las figuras 52 y 53 se muestra un ejemplo de la evolución de las series estivales de NDVI y balance hídrico en las áreas de cultivos de secano y en los bosques de coníferas. La evolución de ambas curvas estacionales es paralela en el caso de los bosques de coníferas, mientras que la evolución de los cultivos herbáceos de secano entre 1989 y 1993 no muestra una evolución similar a la del NDVI.

figura 52

EVOLUCIÓN DE LOS VALORES ESTIVALES DE NDVI Y BALANCE HÍDRICO EN LAS ÁREAS DE CULTIVOS DE SECANO A PARTIR DE LA AGREGACIÓN DE TODOS LOS PÍXELES QUE CORRESPONDEN A ESTA CUBIERTA.

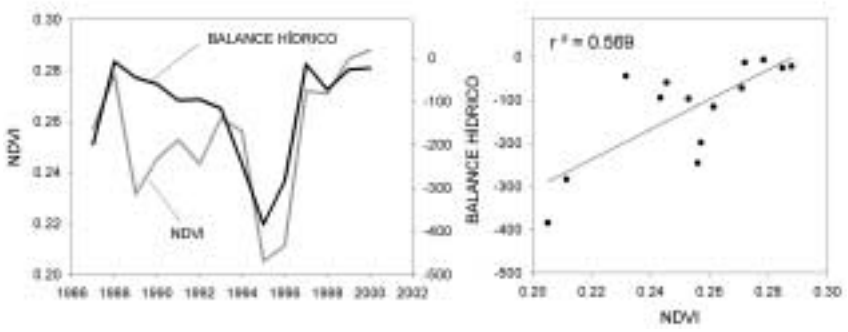
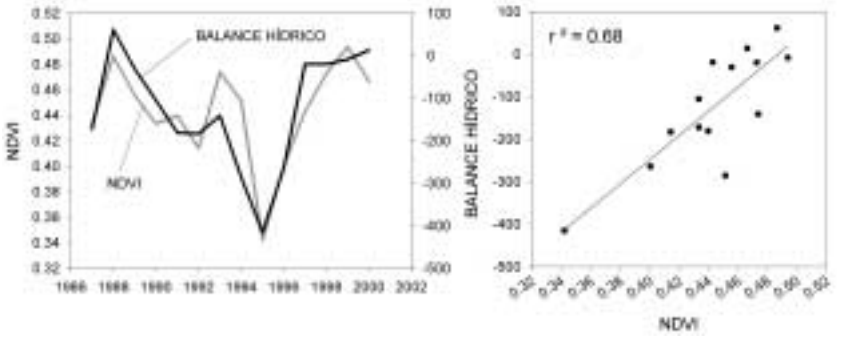


figura 53

EVOLUCIÓN DE LOS VALORES ESTIVALES DE NDVI Y BALANCE HÍDRICO EN LAS ÁREAS DE BOSQUES DE CONÍFERAS A PARTIR DE LA AGREGACIÓN DE TODOS LOS PÍXELES QUE CORRESPONDEN A ESTA CUBIERTA.



Finalmente, los resultados de la correlación entre los valores de ETP y los de NDVI estacionales en las diferentes cubiertas se muestran en la tabla 15. Excepto en el caso de los bosques de coníferas durante la estación invernal, el resto de los usos y cubiertas del suelo no presentan una correlación significativa entre la ETP y los valores estacionales de NDVI. Sin embargo, se puede comprobar que en primavera y verano predominan valores negativos en las correlaciones, mientras que en invierno y otoño, a pesar de no resultar significativas, las correlaciones son altas, y en todos los casos positivas. Por esta razón,

todas las formaciones vegetales del área de estudio se verán favorecidas por altos valores térmicos durante estas estaciones del año, mientras que superiores valores térmicos tendrán un peso negativo en primavera y verano al incrementarse las demandas hídricas por parte de la vegetación.

tabla 15

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES ESTACIONALES DE NDVI Y LOS DE ETP EN LAS DIFERENTES ESTACIONES DEL AÑO. LOS ANÁLISIS SE REALIZAN A PARTIR DE LA AGREGACIÓN DE LA TOTALIDAD DE LOS PÍXELES DE CADA UNA DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO. * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$), ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$).

	Primavera	verano	Otoño	Invierno
Secanos (herbáceas)	-0.13	-0.13	0.23	0.41
Secano (permanentes)	0.07	-0.07	0.34	0.48
Regadíos	-0.30	-0.20	0.37	0.25
Frondosas	0.11	0.24	0.48	0.46
Coníferas	-0.02	-0.01	0.42	0.51
Matorrales	-0.05	-0.08	0.41	0.49

En la figura 54 se muestran una clasificación estacional del área de estudio de acuerdo a las variables climáticas que condicionan en mayor medida la actividad vegetal. En primavera se produce una importante fragmentación espacial de acuerdo a la influencia de los factores climáticos en el desarrollo de la vegetación. No obstante, predomina la influencia del balance hídrico y de las precipitaciones en sectores más concretos, aunque las correlaciones no son significativas en la mayor parte del área analizada.

En verano, en cambio, se produce un control general de la actividad vegetal por parte de los valores de humedad del suelo, con la excepción de las amplias áreas de regadío. Los espacios en los que las correlaciones no resultan significativas son escasos, por lo que se trata de la estación del año donde las condiciones hídricas tienen un más importante papel sobre la explicación de la actividad vegetal. En otoño e invierno, sin embargo, la influencia de las variables climáticas se reduce espacialmente de forma significativa, perdiendo peso las precipitaciones y las condiciones de balance hídrico del suelo y ganándolo los valores de ETP, sobre todo en el sector más meridional del área de estudio.

En las tablas 16 a 19 se muestra el porcentaje de superficie en los diferentes usos del suelo en los que las distintas variables climáticas tienen un peso más significativo al explicar la actividad de la vegetación. Los aspectos más importantes son que en primavera dominan las áreas en las que no se registran correlaciones significativas, aunque

importantes porcentajes de los bosques de frondosas y coníferas responden claramente a las condiciones de humedad del suelo. Hay que señalar que otros factores climáticos pueden tener un peso importante sobre la dinámica interanual de la vegetación. Por ejemplo, las heladas tardías de primavera suelen tener unos muy negativos efectos sobre los cultivos, sobre todo en las áreas de regadíos (Martí, 1993; Hernández, 1992), por lo que es de esperar que no todos los espacios muestren una variabilidad vegetal explicada por los factores considerados.

En verano, en cambio, predomina la influencia de las condiciones del balance hídrico del suelo en todos los usos, aunque en mayor medida en los cultivos de secano (herbáceas y permanentes) y en las áreas de matorrales y pastizales. Las áreas boscosas presentan una menor respuesta, ya que en su mayoría se ubican en los sectores que reciben mayores precipitaciones, por lo que los déficits absolutos serán, en realidad, inferiores.

Las áreas de secano ya se encuentran cosechadas en esta estación, y el desarrollo de especies herbáceas naturales, tras la recolección, dependerá de las condiciones acumuladas de humedad del suelo (Braun-Blanquet y Bolós, 1957), ya que tanto estas especies, como las que ocupan las áreas de matorrales y pastizales naturales, presentan sistemas radiculares poco desarrollados y su actividad en esta estación dependerá de la humedad del suelo. Los espacios boscosos o los cultivos de regadío, en este caso gracias a los aportes mediante riego, muestran un menor porcentaje de superficie afectada por las condiciones de humedad del suelo que el resto de los usos.

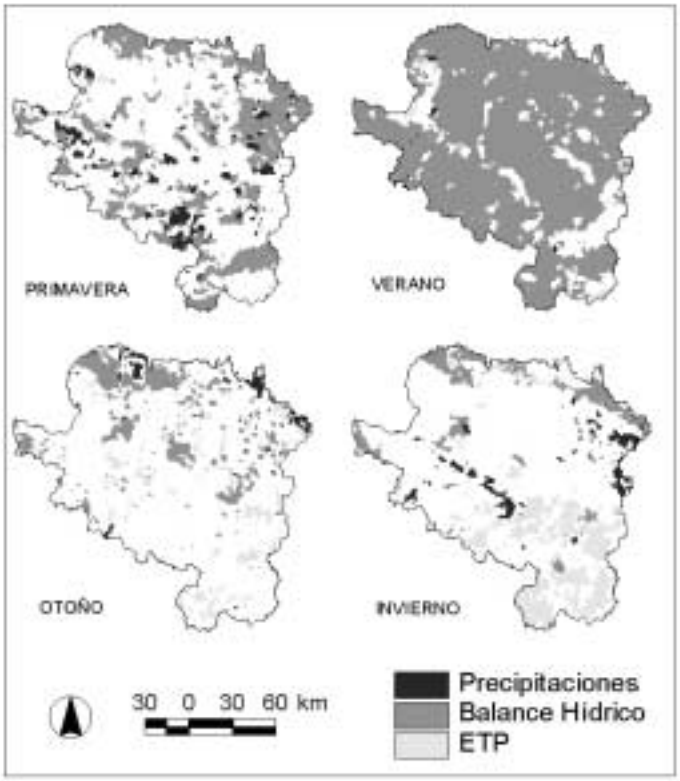
tabla 16

PORCENTAJE DE SUPERFICIE OCUPADA POR LAS DIFERENTES CUBIERTAS DEL SUELO EN LAS QUE LOS MAYORES VALORES DE CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA CORRESPONDEN CON ALGUNA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS CONSIDERADAS DURANTE LA PRIMAVERA.

Usos del suelo	No significativo	Precipitación	ETP	Balance H.	Total
Cultivos de secano (herbáceas)	78.29%	8.05%	0.75%	12.91%	100.00%
Cultivos de secano (permanentes)	54.73%	8.11%	0.00%	37.16%	100.00%
Cultivos de regadío	52.45%	6.45%	2.60%	38.50%	100.00%
Bosques de frondosas	41.62%	0.30%	2.40%	55.69%	100.00%
Bosques de coníferas	55.60%	2.79%	1.15%	40.46%	100.00%
Matorrales y pastizales	62.43%	6.07%	0.53%	30.97%	100.00%
Total general	63.19%	6.30%	1.22%	29.29%	100.00%

figura 54

CLASIFICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DE ACUERDO A LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE MÁS INFLUYEN SOBRE LOS VALORES ESTACIONALES DE NDVI. SÓLO SE HAN CONSIDERADO AQUELLOS PÍXELES EN LOS QUE EXISTEN CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS ($p < 0.05$). LOS ESPACIOS EN BLANCO NO MUESTRAN ASOCIACIÓN CON NINGUNA DE LAS VARIABLES CONSIDERADAS.



En otoño desciende la superficie en la que los factores climáticos tienen un peso significativo. Sin embargo, se puede comprobar que aumenta la influencia de la ETP en las áreas de bosques, tanto de frondosas como de coníferas, ya que condiciones térmicas más suaves aumentarán el periodo vegetativo de, por ejemplo, los robledales que se ubican en los puertos de Beceite o en el sector prepirenaico. Dado que las condiciones de humedad del suelo durante esta estación son superiores a las estivales, la actividad de los bosques se verá favorecida.

tabla 17

PORCENTAJE DE SUPERFICIE OCUPADA POR LAS DIFERENTES CUBIERTAS DEL SUELO EN LAS QUE LOS MAYORES VALORES DE CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA CORRESPONDEN CON ALGUNA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS CONSIDERADAS DURANTE EL VERANO.

Usos del suelo	No significativo	Precipitación	ETP	Balance H.	Total
Cultivos de secano (herbáceas)	10.06%	0.73%	0.22%	89.00%	100.00%
Cultivos de secano (permanentes)	4.73%	4.05%	2.70%	88.51%	100.00%
Cultivos de regadío	25.39%	0.24%	3.40%	70.98%	100.00%
Bosques de frondosas	21.86%	0.00%	3.29%	74.85%	100.00%
Bosques de coníferas	18.43%	0.27%	3.06%	78.24%	100.00%
Matorrales y pastizales	14.55%	0.19%	0.77%	84.50%	100.00%
Total general	16.54%	0.39%	1.59%	81.47%	100.00%

Finalmente, en invierno aumenta la superficie, respecto al otoño, de las diferentes cubiertas del suelo en las que la influencia de los diferentes factores climáticos es significativa. No obstante, el área en la que se registran correlaciones significativas es superior en las áreas de vegetación natural que en los espacios cultivados, aunque en todos los casos (excepto en las áreas de cultivos de regadío, donde es la precipitación la variable con la que se registra una mayor superficie de correlación significativa), aumenta el peso de la ETP.

tabla 18

PORCENTAJE DE SUPERFICIE OCUPADA POR LAS DIFERENTES CUBIERTAS DEL SUELO EN LAS QUE LOS MAYORES VALORES DE CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA CORRESPONDEN CON ALGUNA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS CONSIDERADAS DURANTE EL OTOÑO.

Usos del suelo	No significativo	Precipitación	ETP	Balance H.	Total
Cultivos de secano (herbáceas)	87.70%	0.14%	1.36%	10.81%	100.00%
Cultivos de secano (permanentes)	87.84%	0.00%	3.38%	8.78%	100.00%
Cultivos de regadío	81.53%	1.63%	10.60%	6.23%	100.00%
Bosques de frondosas	67.07%	2.99%	17.96%	11.98%	100.00%
Bosques de coníferas	56.37%	6.94%	14.27%	22.42%	100.00%
Matorrales y pastizales	76.38%	2.60%	9.33%	11.69%	100.00%
Total general	78.81%	2.08%	8.01%	11.10%	100.00%

Así pues, se ha comprobado que la influencia de las diferentes variables consideradas (precipitación, temperatura, ETP y balance hídrico) presenta notables diferencias en función de los distintos usos del suelo. A escala anual existe un mayor porcentaje del área de estudio afectado por los valores medios de balance hídrico del suelo que por los de precipitaciones, temperaturas o ETP. No obstante, la diferenciación espacial resulta muy clara. En amplias áreas donde los secanos resultan menos productivos, los valores de pre-

cipitación anual van a tener un peso superior a los valores medios de balance hídrico del suelo, coincidiendo, a nivel anual, con los resultados obtenidos por otros autores al analizar las producciones agrícolas en estos espacios, altamente condicionadas por los valores anuales de precipitación (Austin *et al.,* 1998; McAneney y Arrúe, 1993). Las áreas boscosas amortiguan los posibles déficits anuales debido a sus más profundos sistemas radiculares, pero se verán afectados por déficits a más larga escala temporal, como son los reflejados por los balances hídricos del suelo. Este hecho puede explicar el más alto porcentaje de las áreas de bosques de frondosas y coníferas, cuyas correlaciones entre los valores de ΣNDVI y los de balance hídrico del suelo resultan significativas (74.6 % y 56.2 %, respectivamente). En el caso de los cultivos de secano, únicamente el 25 % de los espacios muestran una correlación significativa entre ambas variables. Frente a ello, la diferencia entre la superficie en la que se producen correlaciones significativas y positivas entre las precipitaciones y el ΣNDVI en los cultivos de secano y en las áreas boscosas es muy importante (19.6 % y 0 %, respectivamente).

tabla 19

PORCENTAJE DE SUPERFICIE OCUPADA POR LAS DIFERENTES CUBIERTAS DEL SUELO EN LAS QUE LOS MAYORES VALORES DE CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA CORRESPONDEN CON ALGUNA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS CONSIDERADAS DURANTE EL INVIERNO.

Usos del suelo	No significativo	Precipitación	ETP	Balance H.	Total
Cultivos de secano (herbáceas)	84.49%	1.85%	11.59%	2.07%	100.00%
Cultivos de secano (permanentes	74.32%	4.73%	15.54%	5.41%	100.00%
Cultivos de regadío	83.04%	11.09%	3.68%	2.19%	100.00%
Bosques de frondosas	56.29%	2.10%	13.47%	28.14%	100.00%
Bosques de coníferas	60.42%	1.64%	15.47%	22.47%	100.00%
Matorrales y pastizales	67.37%	1.49%	19.40%	11.74%	100.00%
Total general	75.44%	4.14%	12.55%	7.86%	100.00%

Así pues, el peso de los déficits hídricos va a resultar muy diferenciado en función de los distintos usos del suelo presentes en el sector central del valle del Ebro. Las áreas de escasa vegetación son más vulnerables a los déficits que se producen en el año en curso, mientras que las áreas boscosas, de mayor cubierta vegetal, solamente se verán afectadas cuando los déficits se acumulen en el tiempo y se asista a situaciones de sequía más prolongadas.

Además, se ha comprobado que la influencia de las diferentes variables climáticas cambia considerablemente entre las estaciones del año. En general, se puede afirmar

que es durante las estaciones primaveral y estival cuando la vegetación es más sensible a la disponibilidad de recursos hídricos, momentos en los que la actividad vegetal es superior, como consecuencia de las altas temperaturas. En todos los casos las precipitaciones que se registran durante la propia estación tienen un peso inferior sobre los diferentes usos del suelo que los valores de balance hídrico, los cuales registran las condiciones de humedad durante periodos de tiempo más amplios.

La producción vegetal está, pues, más íntimamente relacionada con las condiciones de humedad del suelo. Sin embargo, las correlaciones en muchos casos no resultan significativas, ya que se puede decir que existen otros muchos factores que alteran la relación agua-producción. Por ejemplo, en áreas mediterráneas un importante porcentaje de las precipitaciones se registra durante la estación fría, lo que supone que la relación precipitación-producción resulte diferente a la de las áreas en las que las precipitaciones se producen durante los periodos de más altas temperaturas.

Este aspecto dificulta el análisis de la influencia de las precipitaciones sobre la actividad vegetal, y explica que no sean las precipitaciones que se reciben en una estación, sino la acumulación de agua en el suelo, a lo largo de amplios periodos de tiempo, la que explique, en mayor medida, las diferencias temporales en la vegetación. Así pues, el establecimiento de adecuadas relaciones explicativas entre las condiciones vegetales y las climáticas puede estar dificultado por el posible retardo en la respuesta vegetal, debido a que el suelo tiene capacidad de retención de agua y la vegetación puede hacer uso de ella tiempo después de las precipitaciones. Las plantas presentan una gran capacidad para limitar la transpiración por medio del control de los estomas, y porque las raíces pueden tener acceso a la humedad que se encuentra a mayor profundidad. Por ello, un descenso en la disponibilidad de agua puede no traducirse directamente en un descenso del NDVI. Este aspecto puede explicar el bajo peso de las precipitaciones en la explicación de la actividad vegetal en las diferentes estaciones, ya que únicamente cuando se han agregado los valores de precipitación a escala anual se aprecia su influencia sobre la producción de amplias áreas de cultivos de secanos, matorrales y pastizales.

En general, los estudios que se han realizado sobre este tema señalan que suelen registrarse correlaciones más altas entre el NDVI y los valores de precipitación acumulada durante diferentes meses. Numerosos trabajos muestran que la respuesta de la vegetación no sólo responde a las condiciones climáticas de las estaciones o periodos de crecimiento vegetal, sino que en muchas ocasiones se puede producir un retardo, e incluso una importante influencia de las condiciones climáticas que se registraron en el anterior

periodo de crecimiento vegetativo. Este aspecto puede explicar las mayores correlaciones obtenidas en el sector central del valle del Ebro con los valores de humedad del suelo, ya que la respuesta de estos balances ante las precipitaciones, o las condiciones térmicas de un mes concreto, es escasa. Estos balances registran, aproximadamente, una escala temporal de dos años (la correlación entre la normalización de estos balances hídricos y el SPI a la escala de 24 meses en el conjunto del área de estudio es de 0.73).

Wang *et al.* (2001) indican que las correlaciones son superiores considerando un retardo del NDVI respecto a las precipitaciones entre 2 y 3 meses. Aunque estos autores señalan que el NDVI a una determinada escala temporal está influido, en mayor medida, por las precipitaciones durante el intervalo que incluye el periodo de crecimiento de la vegetación y parte o la totalidad del año anterior. Las correlaciones resultan, pues, más significativas cuando las precipitaciones se acumulan en periodos de tiempo largos. Richard y Poccard (1998) señalan un máximo de actividad fotosintética uno o dos meses después del pico estival de precipitaciones en Sudáfrica. Justice *et al.* (1986) y Davenport y Nicholson (1993) muestran la existencia de un retardo de dos meses entre los picos de precipitación y la respuesta del crecimiento de la vegetación en el este de África. Sin embargo, también señalan que las curvas de NDVI y las de las precipitaciones pueden diferir de forma significativa entre distintas formaciones vegetales. Estos últimos autores indican que las curvas de NDVI se comportan de forma paralela a las curvas de medias móviles de 3 meses de las precipitaciones, en mayor medida que considerando las series mensuales de precipitación.

Además, el momento en que se produce y la intensidad con la que ha caído la precipitación es crítico en la determinación de la utilidad de las precipitaciones para la producción vegetal en ámbitos semiáridos. Justice e Hiernaux (1986) identifican 2 eventos de precipitación que representan un importante papel en el desarrollo de la vegetación anual. El primero son las precipitaciones que aportan la humedad suficiente para permitir la germinación y las primeras fases de crecimiento vegetal. El segundo es el inicio de las precipitaciones regulares que permiten un desarrollo vegetal continuo sin interrupción y corresponde con el periodo de crecimiento, floración y fructificación. Esto da idea de las condiciones de estrés hídrico en ambas fases, que pueden afectar de forma diferenciada a las condiciones vegetales.

En general, los principales factores identificados en el control de la producción vegetal incluyen la suma total de precipitaciones y el periodo de tiempo en que se producen las mismas, las cuales controlan la disponibilidad de humedad en el suelo que

determina las diferentes fases fenológicas en el ciclo de las plantas anuales. Otros factores que no se han tenido en cuenta, como la escorrentía superficial, que pudiera producirse en los eventos de mayor intensidad en el centro del valle, o la infiltración de los suelos, podrían alterar las relaciones NDVI-clima. Pero incluso otro tipo de factores relacionados con las prácticas antrópicas podrían llegar a explicar, por ejemplo, la diferenciación espacial que se ha comprobado dentro de las áreas de cultivos de secano. Lampurlanés *et al.* (2001) indican que la infiltración de agua en los campos de secano del sector central del valle del Ebro varía significativamente en función de los sistemas de laboreo. Estos autores señalan que el mínimo laboreo será mejor para estas regiones semiáridas, ya que este tipo de práctica mantiene una mayor cantidad de agua en el suelo y permite un mayor desarrollo de los sistemas radiculares a diferentes niveles, lo que facilitará un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos. Así pues, la dependencia y vulnerabilidad respecto a las condiciones climáticas podrá depender también mucho de aspectos espacialmente locales relacionados con las prácticas agrícolas, el suelo o la microtopografía.

Junto a todos estos factores también hay que tener en cuenta la diversidad fisiológica de las diferentes cubiertas vegetales. Debemos ser cuidadosos al interpretar los resultados de las comparaciones entre los datos de satélite y los datos pluviométricos debido a la variabilidad que se produce en la eficacia en el uso del agua disponible por parte de la vegetación. Tucker y Choudhury (1987) indican valores con un rango de 0.5 kg/ha/mm/año en especies subdesérticas, entre 3 y 6 kg/ha/mm/año para espacios semiáridos, y unos 30 kg/ha/mm/año en campos de cultivo en áreas fértiles y con elevada gestión humana.

La acumulación de déficits pluviométricos a mayor escala temporal, tal como señalan numerosos trabajos influye en mayor medida sobre los valores de NDVI. Esta consideración está íntimamente relacionada con la definición de las sequías que hemos considerado en este trabajo: déficits pluviométricos prolongados a diferentes escalas temporales. Los indicadores de sequía utilizados retienen, de forma continua en el tiempo, las anomalías acumuladas, por lo que desde un planteamiento más amplio, y considerando el efecto de los periodos secos sobre la actividad vegetal, se relacionan los valores de actividad vegetal, medidos a partir del NDVI, y los indicadores de sequía a diferentes escalas temporales {*Standardized Precipitation Index* (SPI) a la escala de 3, 6, 12 y 24 meses}.

influencia de las sequías sobre la vegetación natural y los espacios agrarios en el sector central del valle del ebro

7. Influencia de las sequías sobre la vegetación natural y los espacios agrarios en el sector central del valle del Ebro

Determinar el impacto de las sequías sobre la vegetación natural y los cultivos no es fácilmente cuantificable. La pérdida de agua en las hojas es una inevitable consecuencia del intercambio de CO_2 entre la planta y la atmósfera, por ello, la arquitectura hidráulica del continuo suelo – planta – atmósfera representará un papel determinante en la respuesta a las condiciones de sequía (Kozlowski *et al.,* 1991). La alteración de los niveles de humedad en el suelo como consecuencia de la ocurrencia de sequías tendrá impactos directos sobre el estado hídrico de las hojas, modificando la asimilación de carbono y las tasas de ETP (Hanson y Weltzin, 2000). Existen diferentes trabajos donde se aborda en detalle la respuesta de la vegetación ante las condiciones de estrés hídrico y sequía (ver revisiones en: Kramer, 1983; Hanson y Weltzin, 2000). El impacto de las sequías puede ser diferente en función de las características del suelo o de la arquitectura y fisiología de las plantas. Las diferencias genéticas entre individuos o especies puede influir en la supervivencia diferencial ante severos episodios de sequía, de tal forma que las especies que regulan su metabolismo hacia un uso más eficaz de los limitados recursos presentan mayor capacidad de resistencia a las sequías (Abrams *et al.,* 1990). Pero además de todas estas cuestiones, también habrá que tener en cuenta que las sequías tienen impactos diferentes en función de la estación del año en la que aparecen, ya que estacionalmente las necesidades de agua por parte de la vegetación cambian. Debido a estas dificultades, tanto en la cuantificación como en la diferenciación espacial, ha sido frecuente la utilización de imágenes de satélite en la determinación de los impactos de las sequías sobre la vegetación, al permitir una información espacial y temporalmente continua.

El NDVI se ha utilizado de forma recurrente para identificar la severidad de las consecuencias de las sequías, sobre todo en las regiones africanas donde las consecuencias de este fenómeno son más catastróficas (Hielkema *et al.,* 1986). Henricksen (1986) analizó las graves sequías que afectaron a Etiopía durante los años 1983 y 1984 mediante índices de vegetación, procedentes de los satélites de la serie NOAA, y señaló las dramáticas condiciones de crecimiento vegetal, debido a las escasas precipitaciones que se produjeron durante los meses estivales de ambos años, y que dieron lugar a importantes

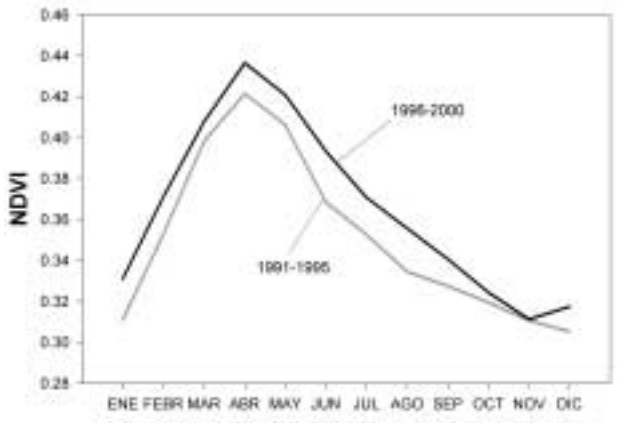
hambrunas y a una gran mortandad. Hellden y Ekludh (1988) también mostraron que las anomalías derivadas de los datos integrados de NDVI en diferentes regiones de Etiopía correlacionaban bien con los datos de anomalías de precipitación y, de hecho, corresponden con las áreas afectadas por sequías climáticas y hambrunas.

Entre los planteamientos metodológicos para analizar las consecuencias de las sequías sobre la vegetación natural y los cultivos, Walsh (1987) investigó la relación que se produce entre los índices climáticos de sequía (en su caso el índice de Palmer) y el valor de los índices de vegetación obtenidos del satélite NOAA-6 en EE.UU. (estado de Oklahoma). Este autor observó una estrecha relación temporal entre ambas variables, identificando valores más altos de NDVI los años en los que el índice de Palmer es positivo. Igualmente, Peters *et al.* (1991) investigaron las relaciones existentes entre el NDVI y las condiciones de sequía en Nebraska, comprobando que el NDVI y los índices meteorológicos de sequía tienen una importante relación estadística directa entre las condiciones de sequía y los daños en la cubierta vegetal. En España, González-Alonso y Casanova (1997) analizaron la distribución espacial de las sequías durante los años 1994 y 1995, a partir del NDVI obtenido de las imágenes AVHRR. Estos autores señalaron que las áreas más afectadas coincidieron, en general, con las regiones que recibieron precipitaciones por debajo del 75 %.

Respecto al sector central del valle del Ebro, en la figura 55 se muestra un ejemplo de la posible influencia que pueden representar las sequías sobre la actividad vegetal. El área de estudio se vio afectada por condiciones de sequía muy extrema durante la primera mitad de la década de 1990, mientras que en la segunda mitad de la década se registraron algunos de los años más húmedos del siglo XX. En la figura se indican los valores mensuales promedio (exceptuando las áreas de regadíos, pues reciben aportes de agua de forma artificial) de los índices de vegetación en la primera y segunda mitad de la década de 1990. A pesar de que el promedio de la totalidad de píxeles pueda enmascarar las notables diferencias que existen a escala local, y el hecho de que en ambos quinquenios también se registraron años de condiciones hídricas contrastadas, se comprueba que durante el primer quinquenio hubo menor actividad vegetal promedio en todos los meses del año, más nítido entre abril y septiembre, meses en los que la disponibilidad hídrica natural resulta inferior y en los que la sequía, en caso de producirse, se deja sentir en toda su influencia.

figura 55

PROMEDIO DE LOS VALORES DE NDVI EN CADA UNO DE LOS MESES EN 1991-95 Y 1996-00 (TODOS LOS PÍXELES DEL ÁREA DE ESTUDIO EXCEPTO LAS ÁREAS DE CULTIVOS DE REGADÍO)



Las diferencias entre ambos quinquenios se reconocen también en los distintos usos del suelo, y son más llamativas en determinados casos. En la figura 56 se muestran las curvas promedio de los quinquenios 1991-95 y 1996-2000 en diferentes cubiertas del suelo. Se observa que las mayores diferencias entre ambos promedios se registran en las áreas de bosques de coníferas, mientras que las diferencias resultan muy pequeñas en los cultivos de secano. Este aspecto puede dar una primera idea de que la respuesta a las sequías puede ser diferenciada en función de los distintos tipos de vegetación.

Aunque múltiples trabajos han analizado la respuesta de la vegetación a las precipitaciones, considerando diferentes intervalos de retardo, y otros también han considerado la relación entre los índices de sequía y el NDVI, no ha sido hasta fechas muy cercanas cuando se han analizado las sequías, a diferentes escalas temporales (como permite el SPI), en su influencia sobre la actividad vegetal (Lotsch *et al.,* 2003; Ji y Peters, 2003). La acumulación de déficits y su posible análisis en los diferentes meses del año introduce múltiples posibilidades, ya que permite captar la influencia de déficits de baja, media y gran amplitud temporal, y reconocer el diferencial impacto de los mismos sobre la actividad vegetal. La potencialidad de considerar diferentes escalas temporales ha sido mostrada por algunos autores. En EE.UU., Wang *et al.* (2001) indican correlaciones altas con las precipitaciones considerando retardos de entre 2 y 3 meses, y también señalan

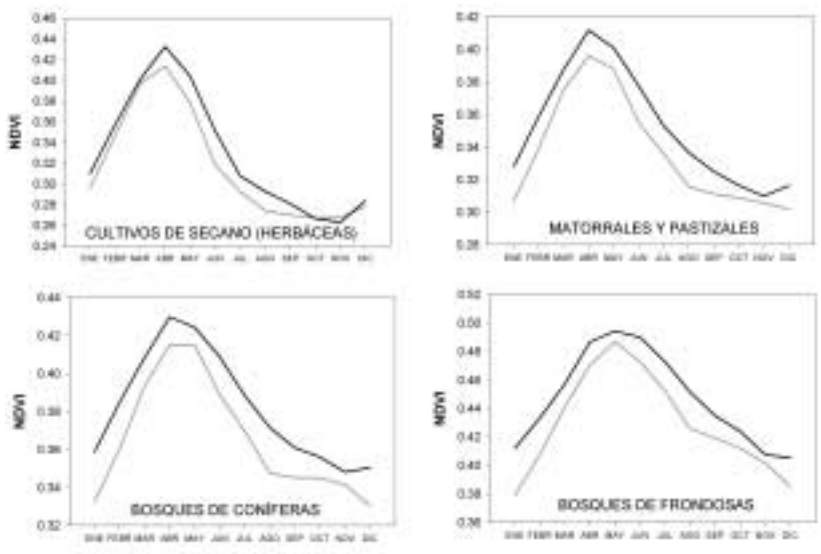
que el NDVI a una determinada escala temporal está influido por las precipitaciones durante el intervalo que incluye el periodo de crecimiento de la vegetación y parte o la totalidad del año anterior.

Otros autores señalan que en África la mayor correlación se produce con las precipitaciones acumuladas durante tres meses (Malo y Nicholson, 1990), explicando el retardo que se produce entre los picos de precipitación y los de NDVI (Justice *et al.*, 1986). Farrar *et al.* (1994), en un estudio sobre la influencia de las precipitaciones sobre el NDVI también indicaron que la correlación es superior a partir del promedio de las precipitaciones de varios meses. También en Brasil, Liu y Kogan (1996) indicaron una mayor respuesta del NDVI a las precipitaciones acumuladas durante periodos de dos y tres meses.

Así pues, las posibilidades que introduce en los análisis la utilización del SPI son notables, ya que permite considerar varias escalas temporales. Con ello se puede determinar con mayor precisión las áreas que están, en mayor o menor medida, afectadas por déficits a escalas cortas (una importante relación entre el NDVI y el SPI a la escala tem-

figura 56

PROMEDIO MENSUAL DE LOS VALORES DE NDVI EN 1991-95 Y 1996-00 EN DIFERENTES USOS DEL SUELO REPRESENTATIVOS.



poral de 3 meses mostrará, por ejemplo, una escasa capacidad de amortiguar los déficits hídricos que aparecen de forma rápida en el tiempo), y los espacios que amortiguan los déficits hídricos cortos, pero que se ven afectados por déficits a una escala temporal superior.

Además, y dado que la actividad vegetal puede estar sometida a diferentes condicionantes en función de las estaciones del año, la influencia de los déficits hídricos puede variar a lo largo del año. Por esta razón, no sólo es interesante considerar diferentes escalas temporales para analizar la influencia de las sequías sobre la actividad vegetal anual en el área de estudio, sino que también reviste gran interés determinar, de forma independiente, la influencia de las sequías en los distintos meses del año.

En el análisis que se desarrolla a continuación se han considerado 4 escalas temporales diferentes en el SPI (3, 6, 12 y 24 meses) que se han utilizado para analizar la influencia de las sequías sobre la actividad vegetal, tanto anual como mensualmente. Estas escalas son las que utiliza el *National Drought Mitigation Center* (NDMC, 2003) para el seguimiento de las sequías climáticas en EE.UU., recogiendo déficits hídricos a corta, media y larga escala temporal. La consideración de otras escalas temporales intermedias no aportaría, en realidad, mayor información y aumentaría innecesariamente el volumen final de resultados. La explicación de las implicaciones de estas escalas temporales y su utilidad para el seguimiento de los recursos hídricos y sus posibles consecuencias sobre la cubierta vegetal puede consultarse en Vicente-Serrano y Cuadrat (2002) y en Komuscu (1999).

El planteamiento metodológico para los análisis es similar al utilizado para estudiar la influencia de diferentes elementos del clima sobre la actividad vegetal. Ello se ha realizado a partir de la interpolación espacial de las diferentes variables climáticas a la misma extensión y resolución espacial que las series de imágenes NDVI.

A partir de los valores de SPI entre 1987 y 2000 calculados en los 41 observatorios disponibles a las escalas temporales de 3, 6, 12 y 24 meses se generaron cartografías continuas de SPI a una resolución de 1 x 1 km. Para ello, se utilizó un método de *splines* con tensión (Mitasova y Mitas, 1993; Vicente-Serrano *et al.,* 2003). El resultado fueron 672 cartografías mensuales (168 a cada escala temporal) que recogen la dinámica de la sequía en los años en los que se analiza la evolución vegetal en el área de estudio (1987-2000).

A continuación se muestra la influencia de las sequías sobre las producciones vegetales anuales (ΣNDVI), como primera aproximación sobre la influencia de las sequías en el sector central del valle del Ebro. Posteriormente se analiza la influencia sobre la actividad vegetal a escala mensual.

7.1. Influencia de las sequías sobre el NDVI a escala anual

En primer lugar se analiza la influencia de los valores del índice de sequía sobre el NDVI. El objetivo es determinar las áreas que resultan más sensibles a las condiciones de sequía en diferentes escalas temporales. Se ha utilizado la serie temporal de cartografías continuas de NDVI anual y las cartografías resultantes del proceso de interpolación de los valores de SPI, en diferentes meses del año, y a diferentes escalas temporales (3, 6, 12 y 24 meses). El análisis ha consistido en el establecimiento de correlaciones píxel a píxel entre las series temporales de SPI y NDVI, y también correlaciones a partir de la agregación del NDVI en los usos del suelo más representativos. El planteamiento es igual al considerado en el análisis de la influencia de las variables climáticas (precipitación, ETP, temperatura y balance hídrico). De esta forma se busca mostrar las áreas en las que la influencia de las condiciones de sequía son más determinantes para el desarrollo de la vegetación.

En la figura 57 se muestra la correlación entre los valores de SPI a la escala temporal de 24 meses y los valores de ΣNDVI de los diferentes años agrícolas. El análisis no solamente ha considerado el valor de SPI correspondiente al año agrícola, (que refleja las condiciones hídricas acumuladas a lo largo de los últimos 24 meses – desde septiembre de dos años antes hasta agosto del año analizado), sino que también se analizan las correlaciones con los valores de SPI de los cuatro meses anteriores, también a la misma escala temporal.

Los valores de correlación son significativos en la mayor parte del área de estudio, tanto si se considera el valor de SPI del mes de agosto, como el de los cinco meses anteriores. No obstante, las más estrechas correlaciones se producen con el SPI a la escala de 24 meses del mes de mayo. Los patrones espaciales están muy definidos y cambian poco entre unos y otros meses, ya que las precipitaciones que se registran en un mes concreto tienen una escasa incidencia sobre el valor del índice a dicha escala temporal.

Las áreas en las que no se registran correlaciones significativas coinciden con las áreas de cultivos de regadío, en las que se ha comprobado que el agua aportada en forma de riego ejerce una importante influencia sobre la dinámica vegetal, y los sectores boscosos del norte (Prepirineo) y sudeste (Puertos de Beceite). Las más altas precipitaciones que se registran en estas áreas (iguales valores de SPI se traducen en valores muy diferentes en cuanto a la magnitud de las precipitaciones), permiten un adecuado desarrollo de la vegetación, y la mayor extensión y profundidad de los sistemas radiculares de las especies arbóreas puede ser la causa de esta menor vulnerabilidad respecto a las condiciones de sequía. En el resto del valle, las producciones de los matorrales y pastizales y las de los amplios sectores de cultivos herbáceos de secano están condicionadas de forma significativa por los valores del índice de sequía a esta amplia escala temporal.

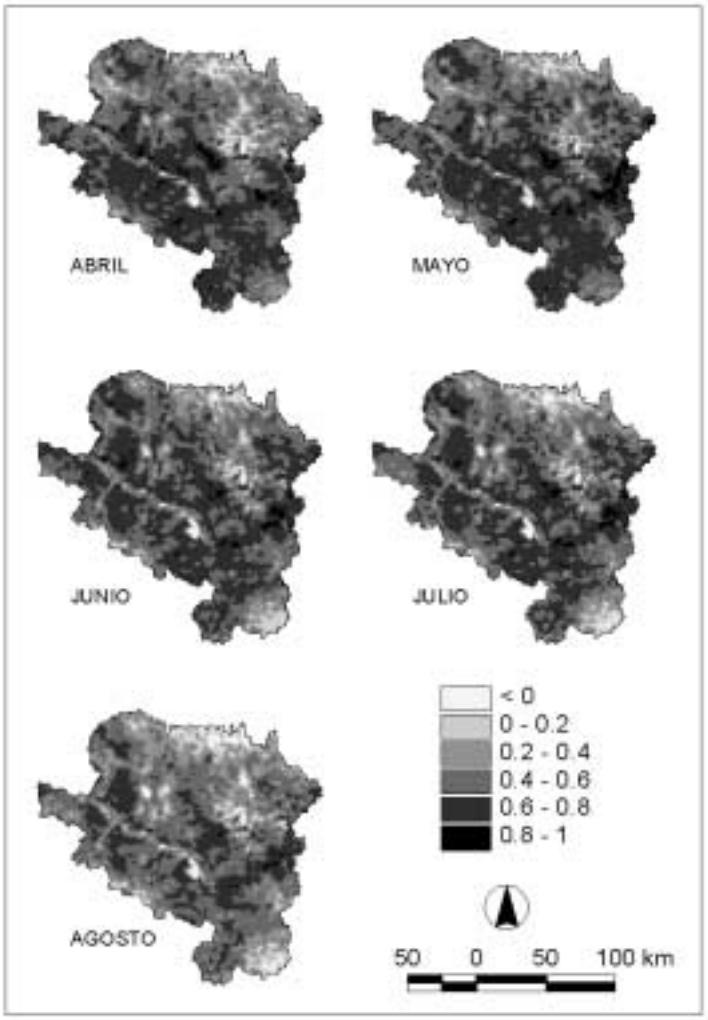
A la escala temporal de 12 meses las áreas con correlaciones significativas disminuyen, haciéndose más patente la diferenciación entre las áreas de matorrales y pastizales del centro del valle (con correlaciones positivas y estadísticamente significativas) y las áreas de regadíos y bosques (Figura 58). Las diferencias espaciales entre unos y otros meses son más nítidas que a la escala temporal de 24 meses, ya que las precipitaciones de un mes concreto influirán significativamente en los valores finales del indicador. Las correlaciones son más estrechas en el caso del SPI del mes de junio, aspecto que indica que las precipitaciones estivales (julio y agosto) apenas tienen influencia sobre la producción vegetal, aspecto lógico en las áreas de cultivos de cereal, que es recolectado entre junio y julio. Las áreas de bosques de frondosas y coníferas en el norte y sudeste del área de estudio tampoco muestran correlaciones significativas, al igual que amplias áreas de cultivos de regadío.

A la escala temporal de 6 meses, los valores del coeficiente de correlación son inferiores, y los cambios espaciales entre unos y otros meses son más dinámicos que a las escalas de 12 y 24 meses, aspecto que indica la mayor influencia de las precipitaciones de un mes concreto en el valor total del indicador (Figura 59).

Los valores de SPI en febrero y marzo solamente influyen positivamente en algunas áreas de cultivos de secano y pastizales del sector occidental del área de estudio. Sin embargo, el índice de sequía en el mes de abril influye en mayor medida, registrándose correlaciones positivas y significativas en amplias áreas del centro del valle. Los patrones espaciales son similares durante el mes de mayo, pero el SPI de junio, julio y agosto muestra correlaciones positivas y significativas con la producción vegetal anual en más áreas, incrementando la influencia significativa incluso en áreas de bosques del sector septen-

figura 57

CORRELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN ANUAL (ΣNDVI) Y LOS VALORES DE SPI (24 MESES) EN DIFERENTES MESES DEL AÑO. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.57.



trional. Además, en los bosques más meridionales tampoco se producen correlaciones significativas entre los valores de SPI y los valores anuales de SNDVI. Se trata de un área en la que la actividad vegetal a escala estacional y anual está más condicionada por los valores de ETP que por las precipitaciones o las condiciones de balance hídrico del suelo.

A la escala temporal de tres meses las áreas en las que se producen correlaciones significativas entre el SPI y los valores de ΣNDVI se incrementan considerablemente considerando el índice de sequía de mayo y junio (Figura 60). En este caso un alto porcen-

figura 58

CORRELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN ANUAL (ΣNDVI) Y LOS VALORES DE SPI (12 MESES) EN DIFERENTES MESES DEL AÑO. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.57.

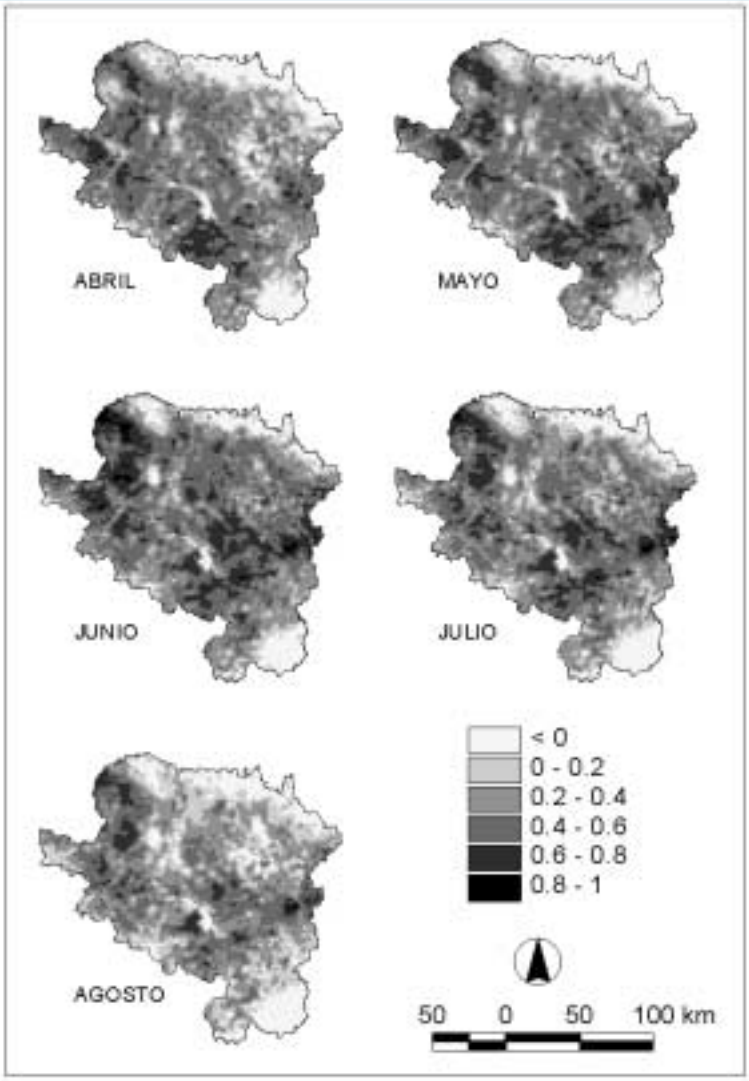
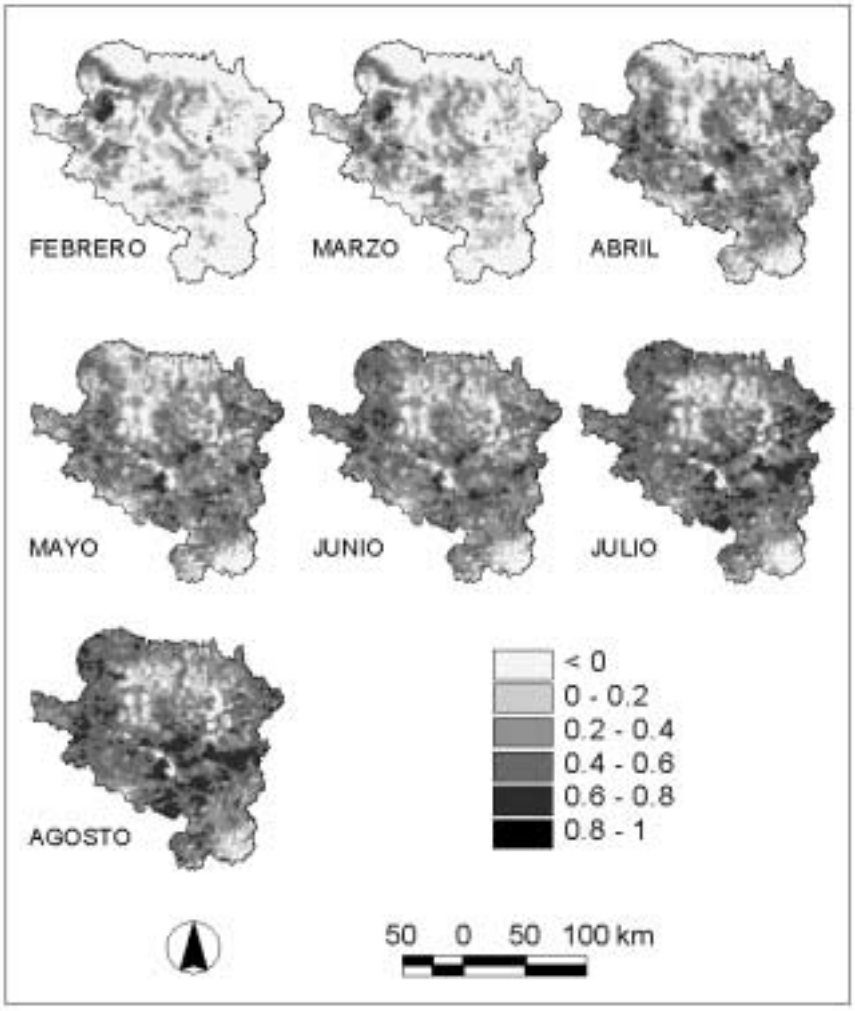


figura 59

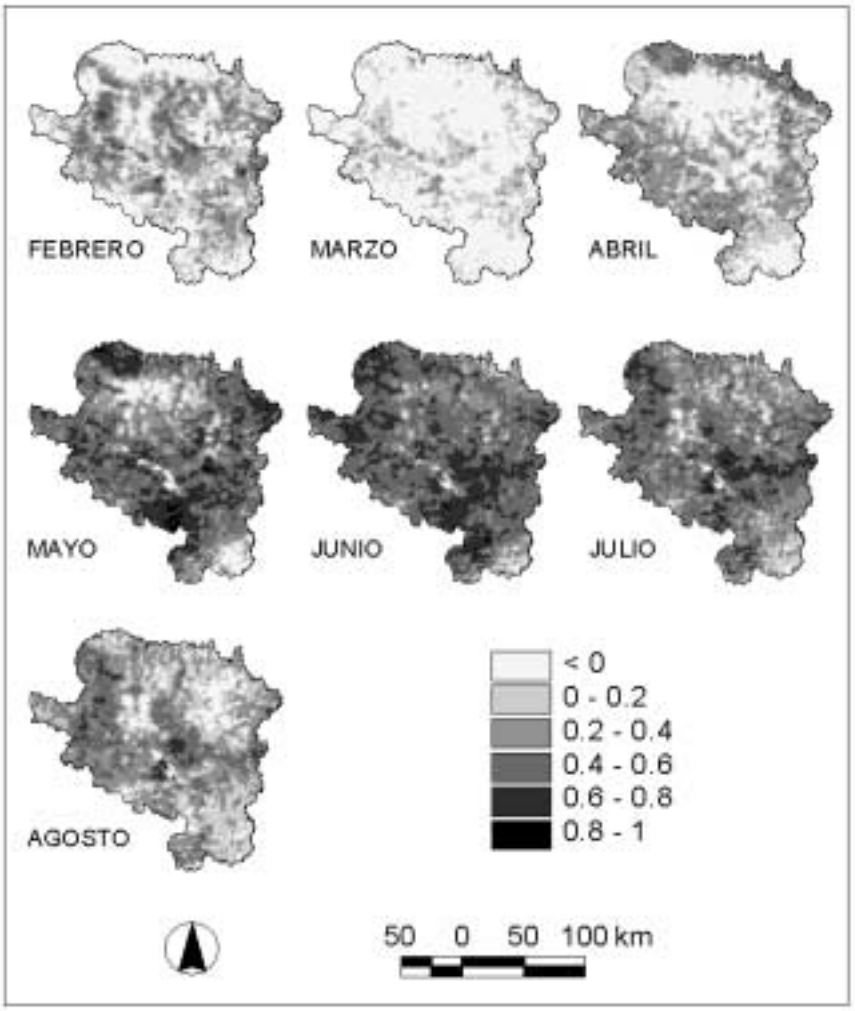
CORRELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN ANUAL (ΣNDVI) Y LOS VALORES DE SPI (6 MESES) EN DIFERENTES MESES DEL AÑO. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.57.



taje del área de estudio muestra una significativa correlación entre los valores de ΣNDVI y los del índice de sequía. Las diferencias espaciales entre unos y otros meses son todavía más significativas que a la escala temporal de 6 meses, ya que a la escala de 3 meses las precipitaciones de un mes concreto tienen un peso muy importante sobre el valor final del indicador.

figura 60

CORRELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN ANUAL (ΣNDVI) Y LOS VALORES DE SPI (3 MESES) EN DIFERENTES MESES DEL AÑO. EL VALOR DE R ESTADÍSTICAMENTE SIGNIFICATIVO, PARA UN NIVEL DE P < 0.05, SE FIJA EN 0.57.



Los resultados a esta escala temporal coinciden con lo que se ha observado en los cultivos de secano mediante datos medidos en campo. Austin *et al.* (1998) demuestran el importante peso que tienen las precipitaciones que se producen durante los meses

invernales sobre las producciones finales de los cultivos de secanos (trigo y cebada), debido a la importancia que tiene el agua disponible en el suelo en las primeras etapas de germinación de los cultivos. Este aspecto se reconoce en la cartografía del SPI del mes de febrero, en la que las áreas con correlaciones significativas coinciden con áreas de campos con cultivos de secano. Estos mismos autores señalan que las precipitaciones primaverales tienen un menor peso sobre la producción final, lo que explica que la superficie, con correlaciones significativas entre el SPI de los meses de abril y marzo y los valores de ΣNDVI, sea inferior, y mayor, de nuevo, con las precipitaciones entre mayo y junio.

En este caso, al igual que en el resto de escalas temporales, las correlaciones entre el SPI (3 meses) de los diferentes meses y el ΣNDVI en las áreas de bosques del sudeste del área de estudio tampoco resultan significativas estadísticamente, mostrándose como un área especialmente insensible a las condiciones hídricas generales, tanto de alta como de baja frecuencia temporal.

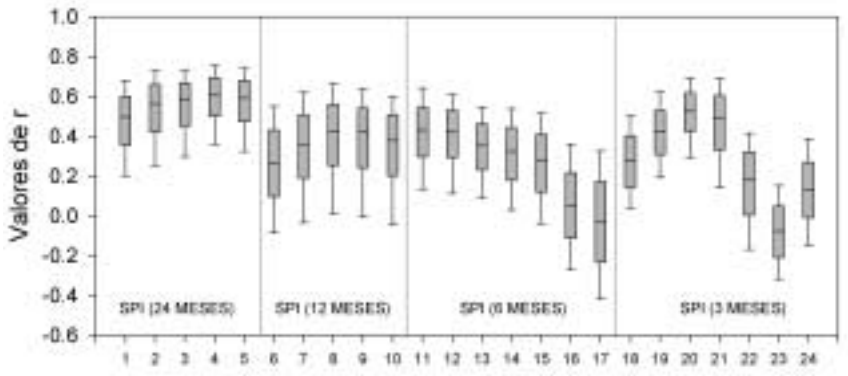
Así pues, las correlaciones positivas más significativas, que afectan a un mayor porcentaje del área de estudio, se producen considerando los valores de los índices de sequía a las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses. Es decir, existe una elevada respuesta temporal, en la mayor parte del área de estudio, con relación a las condiciones de sequía de alta y baja frecuencia, mientras que la escala intermedia (6 meses) es menos significativa para determinar la influencia de las sequías sobre la dinámica interanual de la vegetación.

En la figura 61 se muestra la distribución de los valores del coeficiente r mediante un gráfico de cajas en el que se incluyen los valores de correlación de todos los píxeles (exceptuando las áreas de regadío) obtenidos entre el ΣNDVI y los índices de sequía a diferentes escalas temporales. Se puede comprobar que los valores de correlación son superiores mediante la utilización del SPI a la escala temporal de 24 meses que a las de 12 o 6 meses, y que la escala temporal de 3 meses muestra también una elevada correlación, más significativa considerando el índice del mes de junio.

La producción vegetal anual en el conjunto del área de estudio está, pues, condicionada por las sequías, aunque fundamentalmente por aquellos episodios de baja frecuencia que representan las condiciones generales de humedad o sequedad durante amplios periodos de tiempo. Con ello se comprueba la adaptación de la vegetación a unas duras condiciones climáticas, ya que podrá amortiguar déficits hídricos de 1 año, mientras los daños serán más nítidos cuando se sucedan déficits durante dos años (refle-

figura 61

GRÁFICO DE CAJAS A PARTIR DE LOS VALORES DE CORRELACIÓN EN TODO EL ÁREA DE ESTUDIO (EXCEPTUANDO LAS ÁREAS DE REGADÍOS). EL EJE DE CATEGORÍAS HACE REFERENCIA A LOS VALORES DEL ÍNDICE SPI A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN LOS DISTINTOS MESES. 24 MESES: 1- AGOSTO, 2- JULIO, 3- JUNIO, 4- MAYO, 5- ABRIL. 12 MESES: 6- AGOSTO, 7- JULIO, 8- JUNIO, 9- MAYO, 10- ABRIL. 6 MESES: 11- AGOSTO, 12- JULIO, 13- JUNIO, 14- MAYO, 15- ABRIL, 16- MARZO, 17- FEBRERO. 3 MESES: 18- AGOSTO, 19- JULIO, 20- JUNIO, 21- MAYO, 22- ABRIL, 23- MARZO, 24- FEBRERO.



jados mediante el SPI a la escala temporal de 24 meses). No obstante, hay que señalar que hemos comprobado que amplios espacios de cultivos de secano, matorrales y pastizales del centro del valle muestran una elevada y significativa correlación con las series de SPI a la escala de 12 meses. Estos espacios tendrán menor capacidad para amortiguar los déficits anuales, siendo más vulnerables a la ocurrencia de años secos. A ello podría contribuir el propio carácter de la vegetación, de escaso porte y con sistemas radiculares poco desarrollados y el suelo sobre el que se asienta, con escasa capacidad de retención de agua.

También se ha comprobado que las sequías a escalas temporales cortas pueden afectar significativamente a la producción vegetal final, como se muestra en los meses de mayo y junio a la escala temporal de 3 meses. Los patrones generales de evolución temporal de la productividad vegetal responden, de forma general, a los patrones temporales de las sequías a gran escala, pero sequías cortas (reflejadas mediante el SPI a la escala temporal de 3 meses) en determinados meses, aunque queden insertas dentro de periodos húmedos, pueden tener negativas consecuencias sobre la producción vegetal final.

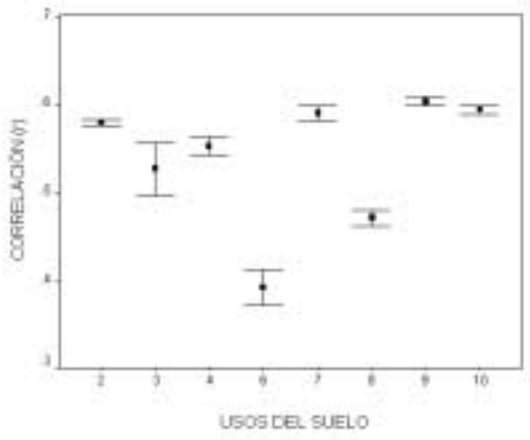
7.1.1. Diferencias en función de las diferentes cubiertas del suelo

Hay que tener en cuenta que la agrupación que se realiza considerando diferentes cubiertas y usos del suelo supone una excesiva simplificación de la variabilidad espacial en la respuesta a las sequías, ya que hemos comprobado una clara diferenciación en el comportamiento temporal entre áreas con el mismo tipo de cubierta vegetal. Pese a ello, un análisis de los patrones generales de comportamiento de las diferentes cubiertas y usos del suelo resulta muy interesante para establecer determinadas conclusiones generales con relación al diferencial comportamiento de la productividad vegetal respecto a las condiciones de sequía.

En la figura 62 se muestran los valores medios y los niveles de confianza de los coeficientes de correlación resultantes entre el ΣNDVI y el SPI a la escala de 24 meses en mayo, ya que es el mes en el que se han señalado mayores correlaciones a esta escala temporal. Se comprueba que la mayor parte de los usos del suelo muestran coeficientes de correlación medios en torno a 0.55 o 0.60, significativos estadísticamente ($p < 0.05$). La excepción son los bosques de frondosas y los bosques mixtos, cubiertas en las que los coeficientes de correlación medios son inferiores al resto.

figura 62

VALORES MEDIOS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPI DE MAYO, A LA ESCALA DE 24 MESES, Y EL ΣNDVI. LOS DIFERENTES CÓDIGOS REPRESENTAN: 2- CULTIVOS DE SECANO (HERBÁCEAS), 3- CULTIVOS DE SECANO (PERMANENTES), 4- CULTIVOS DE SECANO (MOSAICO DE HERBÁCEAS Y PERMANENTES), 6- BOSQUES DE FRONDOSAS, 7- BOSQUES DE CONÍFERAS, 8- BOSQUES MIXTOS, 9- MATORRALES Y PASTIZALES, 10- ÁREAS AGRÍCOLAS CON VEGETACIÓN NATURAL.



En el sector central del valle del Ebro las áreas de cultivos de secano presentan, de forma general, un sistema de año y vez. Austin *et al.* (1998b), mediante la aplicación de un modelo físico de balance hídrico con la utilización de múltiples parámetros edáficos en el sector central del valle del Ebro señalaron que la humedad que contiene el suelo está íntimamente relacionada con las precipitaciones recibidas a lo largo de varios meses acumulados, con relaciones lineales y correlaciones superiores a $r > 0.75$. De hecho, estiman que en el centro del valle durante el año de barbecho, de cada mm de agua precipitada 0.28 mm serían almacenados en el suelo. Estos mismos autores indicaron que, si bien el barbecho no parece presentar una mejora evidente en la producción final, sí puede limitar la incidencia de algunas plagas que, de lo contrario podrían causar graves pérdidas en las cosechas y acentuar los efectos de las sequías. Este hecho podría explicar la alta relación entre los valores de ΣNDVI y los de SPI, a la escala temporal de 24 meses, en las áreas de cultivos de secano en su conjunto.

En el caso de los bosques de coníferas hay que destacar que la diferenciación espacial en la influencia de las sequías es muy evidente. Los altos valores promedio de r están debidos, fundamentalmente a las elevadas correlaciones existentes en los bosques de repoblación del centro de la depresión (Sierra de Alcubierre y montes de Zuera).

Estos bosques se encuentran dentro de sus límites ecológicos de distribución y, tal como se ha puesto de manifiesto en multitud de trabajos, estas áreas serán las más sensibles respecto a las condiciones climáticas. Los estudios realizados sobre el crecimiento radial de las especies arbóreas han señalado que la sensibilidad de la vegetación frente a las sequías es superior en las regiones áridas (Fritts, 1976), ya que la capacidad de amortiguación de unos determinados déficits relativos resultará muy inferior. Por ejemplo, la reducción de 200 mm absolutos, respecto a la media, en los pinares del norte del área de estudio, supondrá que las precipitaciones anuales registradas han estado en torno a 400 mm, lo que permite el normal desarrollo de esta vegetación. En cambio, esa misma reducción en el centro del valle supondrá que las posibilidades de crecimiento de la vegetación queden mermadas considerablemente.

Respecto a la importante respuesta que se produce en dichas áreas de bosques respecto a unos índices de sequía de gran escala temporal (SPI a 24 meses), hay que señalar que esta respuesta ha sido observada en otras regiones boscosas del mundo y evaluada mediante análisis dendrocronológicos. Jonsson *et al.* (2002) analizaron la relación existente entre las sequías y el crecimiento radial del pino canario en Tenerife. Estos autores comprobaron que la influencia de las sequías no es estable en el tiempo, y que

la correlación entre los valores de precipitación y los de crecimiento radial son superiores considerando una media móvil de tres años que con los datos anuales originales, lo que en sí mismo señala la influencia de las condiciones previas al año. Incluso señalan correlaciones más elevadas con los valores de precipitación del año previo que con los del año en curso.

Orwing y Abrams (1997) analizaron con gran detalle la respuesta de diferentes especies forestales a las sequías en áreas con diferentes condiciones climáticas medias. Estos autores comprobaron, en general, que las especies arbóreas pueden seguir experimentando bajos crecimientos radiales entre 2 y 3 años después del año seco. A pesar de que en ámbitos de elevada variabilidad pluvial tras los periodos secos suelen producirse episodios de abundantes precipitaciones registraron persistencia de los efectos de las sequías. Orwing y Abrams (1997) sugieren diferentes hipótesis para explicar la persistente reducción de los crecimientos radiales tras los años secos; éstas estarán relacionadas con la disminución de la capacidad fotosintética de la vegetación y con daños en diferentes mecanismos fisiológicos, como la capacidad de transporte del agua y del carbono en el interior de las plantas. Hanson y Weltzin (2000) señalaron que los efectos de las sequías en las tasas de intercambio de CO_2 entre la planta y la atmósfera podrían ser acumulativos en el tiempo debido a la degradación de los carbohidratos de las plantas, que podrán tardar varios años en recuperarse.

Así pues, hay que contar con que la vegetación puede necesitar un tiempo considerable para recuperarse de los daños causados por las sequías, lo que podría explicar esta elevada relación entre los valores de NDVI integrados a lo largo del año y los índices de sequía a amplias escalas temporales.

La comparación de los valores de r considerando otras escalas temporales en el SPI indican aspectos destacables que resumen lo señalado al analizar detalladamente la influencia de las sequías en la producción vegetal anual. En la figura 63 se muestran los valores medios y niveles de confianza del coeficiente r entre el NDVI para los distintos usos del suelo y el SPI de junio a la escala temporal de 12 meses. En este caso las diferencias entre los usos del suelo son más significativas que a la escala temporal de 24 meses, aunque los valores del coeficiente de correlación resulten inferiores.

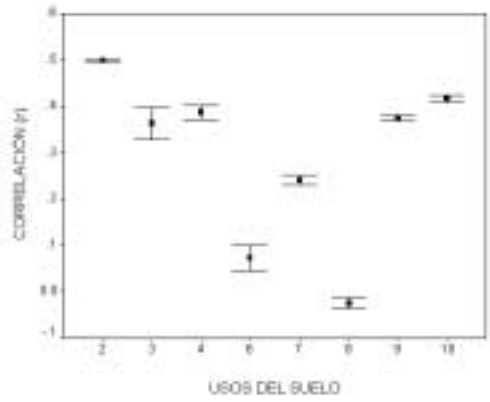
Únicamente las áreas de cultivos de secano muestran una asociación significativa con los valores de SPI, mientras que el resto de los usos del suelo indica correlaciones no significativas de forma promedio. Los bosques son las áreas en las que los valores anua-

les de ΣNDVI están condicionados en menor medida por los valores de SPI. Además, es destacable que sean los bosques de coníferas las comunidades vegetales en las que la diferencia entre las correlaciones medias a las escalas de 12 y 24 meses resultan superiores.

Los resultados parecen mostrar, pues, que aunque también se producen correlaciones significativas a la escala de 24 meses, los valores de productividad vegetal en los cultivos de secano se encuentran muy condicionados por las características pluviométricas del año en curso, tal como comprobaron McAneney y Arrúe (1993) en los Monegros. Estos autores indican que las precipitaciones del año anterior actuarían como un colchón en forma de recarga del suelo para hacer frente a las posibles condiciones de sequía en el año, pero que las producciones finales estarían determinadas por las precipitaciones del año en curso.

figura 63

VALORES MEDIOS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPI DE JUNIO, A LA ESCALA DE 12 MESES, Y EL ΣNDVI. LOS DIFERENTES CÓDIGOS SE DETALLAN EN LA FIGURA 62.



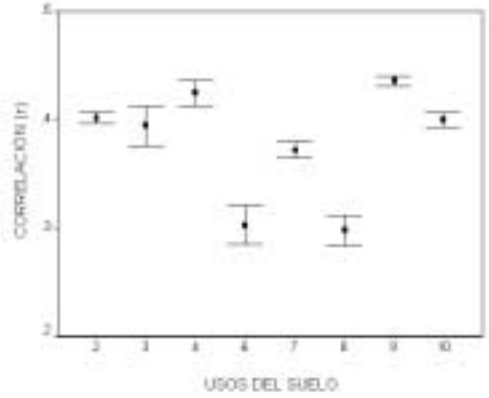
Frente a ello, la productividad de los bosques está determinada, en mayor medida, por las condiciones pluviométricas que se registran a lo largo de dos años, aunque principalmente en los bosques de coníferas y, sobre todo, en aquellos ubicados más cerca de sus límites ecológicos, en el sector central del valle. Los bosques de frondosas muestran una dinámica escasamente determinada por las condiciones de sequía reflejadas por

el SPI a la escala temporal de 12 meses. La localización de estos bosques en los sectores más lluviosos, donde el SPI indica valores absolutos más altos, y el importante peso de las condiciones térmicas y de la ETP en la explicación de la productividad vegetal de estas zonas pueden ser factores que expliquen la menor dependencia hídrica de estos bosques más húmedos. Éstos se encuentran ubicados en condiciones óptimas para su desarrollo, donde será alta la capacidad para amortiguar déficit hídricos durante periodos de un año. Para que se perciban realmente los déficits deberán producirse descensos acusados y más prolongados (por ejemplo 2 años) en las condiciones de humedad, que tengan su manifestación en las disponibilidades de agua por parte de la vegetación.

A la escala temporal de 6 meses los valores medios de correlación descienden en todas las cubiertas, no resultando significativos en ningún caso (Figura 64). Las diferencias entre los distintos usos del suelo son inferiores, por lo que se puede afirmar que el peso de las precipitaciones recibidas a una escala temporal media (6 meses), en diferentes meses del año, es inferior que la acumulada durante periodos de uno o dos años.

figura 64

VALORES MEDIOS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPI DE AGOSTO, A LA ESCALA DE 6 MESES, Y EL ΣNDVI. LOS DIFERENTES CÓDIGOS SE DETALLAN EN LA FIGURA 62.

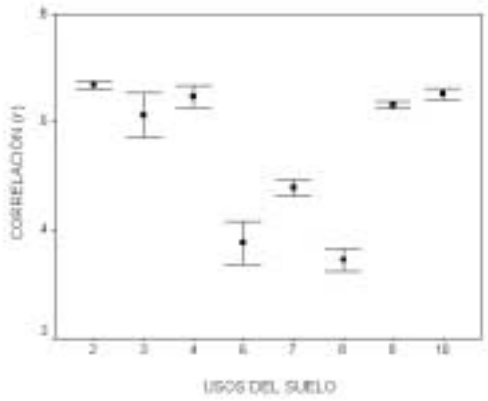


Finalmente, en la figura 65 se muestran las correlaciones medias y los niveles de confianza de los coeficientes r obtenidos entre los valores de SPI del mes de mayo a la escala temporal de 3 meses (mes en el que la correlación a esta escala temporal, en el conjunto del área de estudio, resulta ser superior), y los de ΣNDVI en las cubiertas del

suelo más representativas. Se ha comprobado que la influencia de las precipitaciones en primavera se incrementa en todos los usos del suelo, con relación a lo señalado a la escala temporal de 6 meses. Además, la correlación resulta superior en las áreas de cultivos de secano, coincidiendo también con los resultados obtenidos mediante información de campo, que indican que las precipitaciones de los últimos meses primaverales tienen una importante influencia sobre las producciones finales del cereal (McAneney y Arrúe, 1993; Austin *et al.,* 1998). Frente a ello, los bosques muestran bajas correlaciones, lo que confirma, de nuevo, su capacidad para amortiguar, en su conjunto, los déficits hídricos de más corta duración.

figura 65

VALORES MEDIOS Y NIVELES DE CONFIANZA DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPI DE MAYO, A LA ESCALA DE 3 MESES, Y EL ΣNDVI. LOS DIFERENTES CÓDIGOS SE DETALLAN EN LA FIGURA 62.



7.1.2. Comportamiento diferencial de áreas concretas

Se ha comprobado en las cartografías que existe una importante diferenciación espacial en la asociación entre los valores de ΣNDVI y los del SPI a diferentes escalas temporales, incluso en áreas donde la cubierta del suelo es la misma. Para determinar e ilustrar la diferente asociación que podemos encontrar entre los valores de los índices de sequía y los de ΣNDVI se han estudiado áreas más concretas y homogéneas (tipo de vegetación y características ecológicas). Se han seleccionado 3 áreas representativas en los usos del suelo característicos del sector central del valle del Ebro (cultivos herbáceos

de secano, matorrales y pastizales, y bosques de coníferas). A partir de los promedios de los valores de ΣNDVI y los de SPI, a diferentes escalas temporales, se ha analizado la influencia de las condiciones de sequedad sobre las producciones vegetales mediante análisis de correlación.

Los espacios seleccionados buscan representar las áreas más importantes (por su continuidad espacial) de estos tipos de cubierta vegetal. Las áreas de cultivos de secano se localizan en Monegros, Hoya de Huesca y Belchite. Los pinares se ubican en los montes de Zuera, altas Cinco Villas y Puertos de Beceite, mientras que los sectores de matorrales y pastizales corresponden a las áreas yesíferas del centro del valle, Monegros y altas Cinco Villas. En el caso del SPI a la escala de 24 meses se ha seleccionado el mes de mayo, ya que es el que registra correlaciones superiores para el conjunto de secanos del área de estudio. A la escala de 12 meses se ha seleccionado el mes de mayo, a la de 6 meses el SPI de julio, y a la de 3 el de junio.

En la figura 66 se muestra la relación entre los valores de ΣNDVI en los secanos de Monegros y los SPIs promedio de la zona a diferentes escalas temporales. En este caso, la relación más estrecha se registra con los valores de SPI a la escala de 12 meses (mes de mayo). Ello confirma que las cosechas recogidas en esta área están muy condicionadas por las precipitaciones del año, aunque las del año anterior, y debido al sistema de año y vez que caracteriza el sistema de cultivo en estos secanos, también puede presentar alguna influencia. El barbecho, aunque se ha demostrado que no produce una significativa recarga de humedad del suelo en el sector central del valle del Ebro (López y Arrúe, 1997), podría amortiguar las consecuencias de la sequía durante el año en curso (McAneney y Arrúe, 1993; Austin *et al.,* 1998b). En este caso, la correlación entre ΣNDVI y SPI a la escala de 12 meses, considerando el año agrícola anterior, es de 0.53, frente a una correlación de 0.64 con el SPI del año en curso. De esta forma, en estos cultivos de secano la influencia más alta la ejercen las condiciones hídricas del año en curso, aunque las precipitaciones del año anterior también muestren una influencia positiva.

En otras áreas de cultivos de secano (Hoya de Huesca) los resultados son algo diferentes (Figura 67). La correlación entre los valores de ΣNDVI y los de SPI es inferior. La Hoya de Huesca es un área que recibe precipitaciones medias más altas que Monegros, por lo que los valores de SPI correspondientes a condiciones de sequía representan, en realidad, valores de precipitación más elevados que en el centro del valle. La relación es superior en el caso del SPI a la escala de 24 meses, aunque hay que señalar que ello es resultado de la suma de los dos años. Las precipitaciones del año en curso tienen un peso superior. La correlación

entre el valor de SPI del año agrícola anterior es de r = 0.3, mientras que considerando el SPI del año en curso la correlación es más alta (r = 0.46).

No obstante, únicamente si se consideran los dos años en conjunto la correlación resulta significativa estadísticamente (r = 0.55). Las diferencias encontradas entre estos dos sectores (Monegros y Hoya de Huesca) pueden ser indicativas de que en las áreas más áridas y en las que la pluviometría resulta inferior, los cultivos de secano están más afectados por la ocurrencia de las sequías que en las áreas que reciben mayores aportes pluviométricos.

En otra de las áreas con cultivos de secano, en las que la aridez resulta un elemento dominante (Campo de Belchite, figura 68), y donde las producciones anuales son muy bajas, comprobamos que la relación entre SPI y ΣNDVI se incrementa a todas las escalas de análisis consideradas respecto a los cultivos de secano de la Hoya de Huesca, aunque la correlación es superior considerando el SPI a la escala de 24 meses. Las características climáticas y vegetales de este sector (el más árido y con menor cubierta vegetal de todo el valle) imponen condiciones muy limitantes. Este hecho corrobora la afirmación anterior de que las áreas sometidas a mayor aridez presentan una mayor vulnerabilidad, quedando muy afectadas por los episodios de sequía.

figura 66

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS CULTIVOS DE SECANO DE MONEGROS

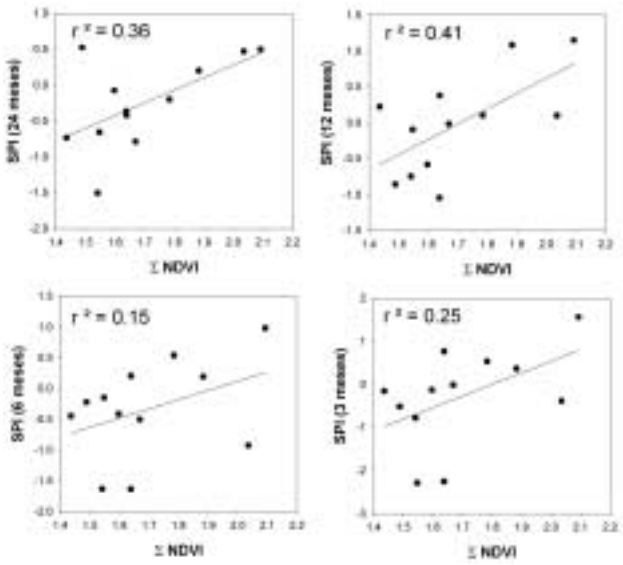
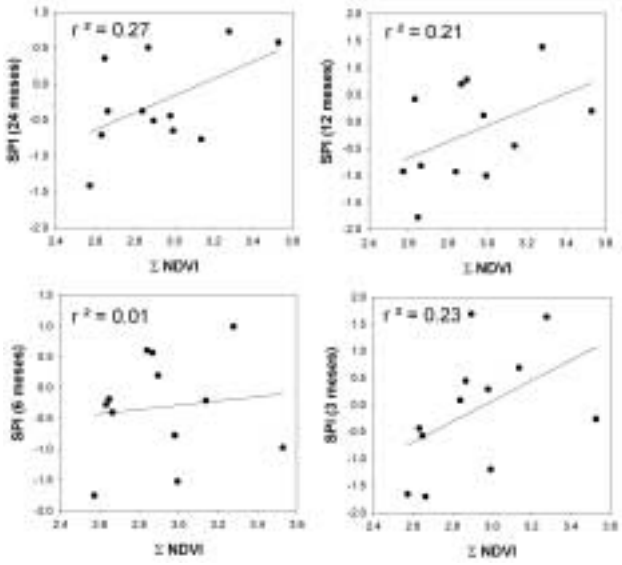


figura 67

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS CULTIVOS DE SECANO DE LA HOYA DE HUESCA.

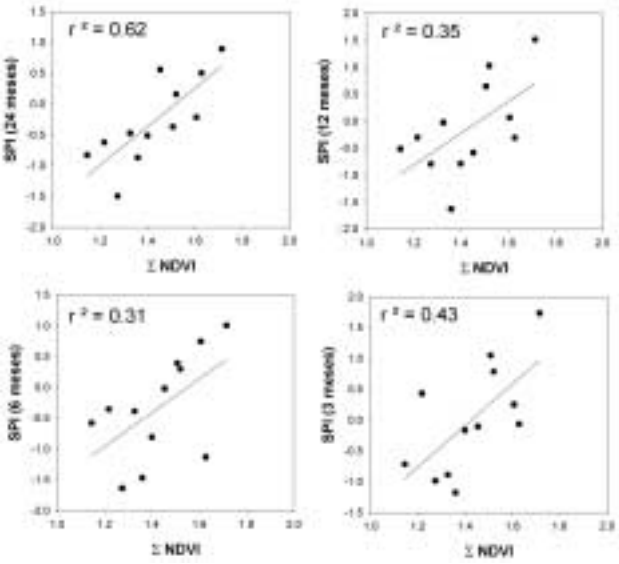


Las explicaciones señaladas en Monegros con relación a los posibles beneficios del barbecho en la amortiguación de los impactos de las sequías, podrían ser válidas también en este caso, lo que explicaría la elevada correlación registrada a la escala temporal de 24 meses. Sin embargo, considerando los indicadores anuales de forma independiente (el SPI a la escala de 12 meses del año en curso y el del año agrícola anterior), el SPI a la escala de 12 meses del año en curso tendrá un mayor peso ($r = 0.59$) que el del año anterior ($r = 0.55$), aunque ambos estadísticamente significativos ($p < 0.05$).

A pesar de ello, no podemos dejar de considerar la importante influencia de los indicadores a menor escala temporal. Este hecho se registra a partir del SPI a la escala de 3 meses en el mes de junio, lo que indica que las precipitaciones de los tres meses anteriores a la cosecha presentan, por sí solas, un peso importante en la explicación de las producciones finales.

figura 68

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS CULTIVOS DE SECANO DE BELCHITE.



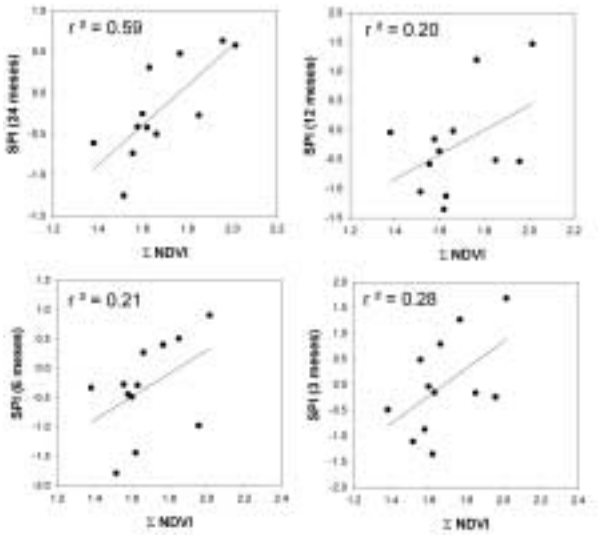
En las áreas de matorrales y pastizales el comportamiento observado con relación a la influencia de las sequías también es contrastado. En la figura 69 se muestra la relación existente entre ambas variables en el sector de pastizales y matorrales del centro del valle, ubicados sobre suelos yesíferos muy pobres (Machín y Navas, 1998) y con graves problemas de erosión (Desir, 2001). Estos espacios tienen una escasa cubierta vegetal y la mayor influencia es del SPI a la escala de 24 meses, presentando un peso más significativo las precipitaciones del año agrícola anterior (r = 0.45), superiores a las del SPI a la escala de 12 meses del año en curso (r = 0.44). Para explicar esta respuesta podríamos repetir la hipótesis de necesidad de recarga del suelo a una mayor escala temporal. Sin embargo, también debemos señalar que es necesario que pase un largo periodo de tiempo para que las especies herbáceas y arbustivas se recuperen de los daños fisiológicos y puedan desarrollar una adecuada producción de semillas tras un periodo seco.

Hay que tener en cuenta que la vegetación desarrolla diferentes mecanismos para hacer frente al estrés hídrico en las diferentes fases de crecimiento, entre las que puede indicarse la reducción del número de semillas viables. Por ejemplo, en la fase de floración

algunas especies herbáceas hacen frente al estrés hídrico disminuyendo el número de granos (Sheperd *et al.,* 2002), por lo que al año siguiente, aunque las condiciones sean húmedas, el número de semillas que permanece en el suelo resulta inferior y los efectos de la sequía podrían seguir manifestándose tiempo después. De todas formas, éste es un espacio de condiciones hídricas similares a las de los secanos herbáceos de Monegros, donde también se registra una escasa capacidad productiva y donde la vulnerabilidad vegetal, debido a la elevada aridez, es patente.

figura 69

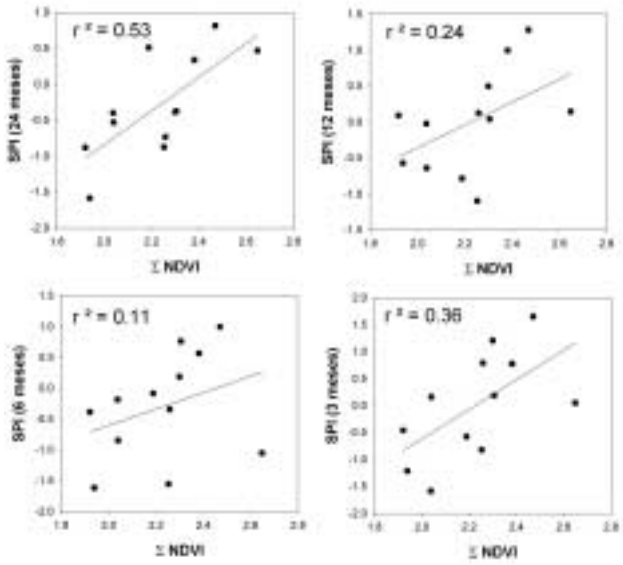
RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS MATORRALES DEL CENTRO DEL VALLE.



Los matorrales de Monegros muestran una relación entre SPI y ΣNDVI similar a la que presenta esta misma cubierta en las zonas yesíferas en el centro del valle (Figura 70), con una mayor influencia de las condiciones de sequía considerando una escala temporal larga. Frente a lo que se señalaba en el caso de los cultivos de secano de este sector, la influencia del SPI correspondiente al año agrícola anterior es superior a la del año en curso (r = 0.62 y r = 0.49, respectivamente). Igualmente, también las sequías a corta escala temporal (3 meses) tienen una importante incidencia sobre los valores integrados finales.

figura 70

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN LOS MATORRALES DE MONEGROS.

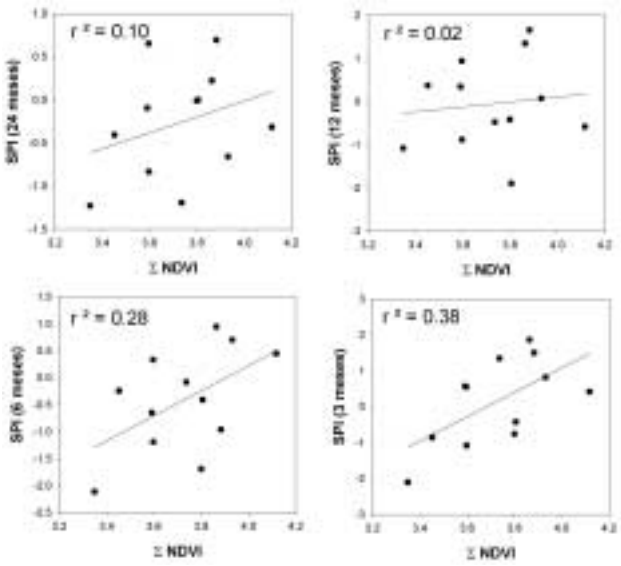


Finalmente, en el sector de las altas Cinco Villas (Figura 71), en un espacio de mayor pluviometría, y donde las condiciones térmicas son más suaves, la producción anual de las áreas de matorrales y pastizales es menos sensible a las condiciones hídricas considerando largas escalas temporales. Únicamente influyen las sequías señaladas a más corta escala temporal, en las que unas elevadas precipitaciones durante los meses de abril, mayo y junio favorecen una mayor productividad. El comportamiento frente a las sequías es similar a lo que sucede en los cultivos de secano de la Hoya de Huesca, donde las precipitaciones son más abundantes.

En esta zona la respuesta de la vegetación a las sequías resulta inferior. La hipótesis más razonable a ello es que los volúmenes hídricos que corresponden a bajos valores de SPI son suficientes en estos sectores para el desarrollo vegetal, mientras que estos mismos valores representan volúmenes muy inferiores de precipitación en el sector central del valle. De esta manera, el resultado confirmaría que, dentro de una misma cubierta del suelo, los ecosistemas ubicados en sus áreas límite de distribución ecológica son más vulnerables a las condiciones de sequía.

figura 71

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS MATORRALES DE LAS ALTAS CINCO VILLAS.



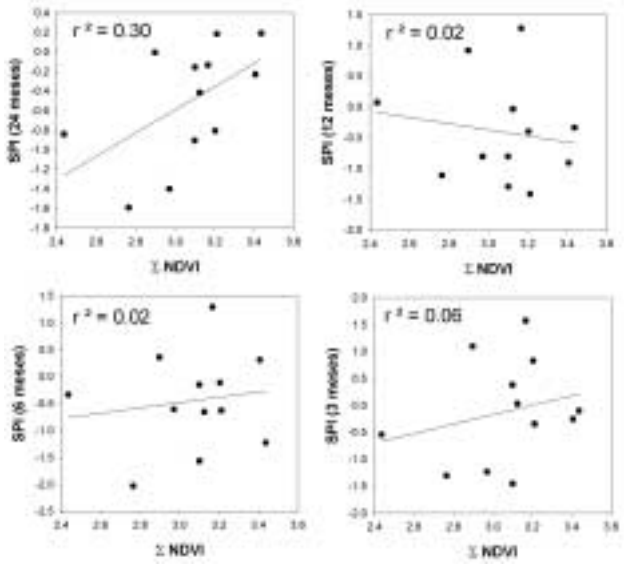
En las figuras 72 a 74 se muestra la relación entre los índices de sequía y los valores de ΣNDVI en diferentes áreas de bosques de coníferas del sector central del valle del Ebro. Las diferencias entre estos espacios son menos notables que las señaladas en las zonas de cultivos de secano y en los pastizales y matorrales estudiados a lo largo del valle.

Un aspecto importante es que la influencia de las sequías es inferior en estos bosques que en las áreas de matorrales o en los cultivos de secano del centro del valle. Las correlaciones son menores en todos los casos. Este aspecto podría estar explicado por la mayor profundidad de los sistemas radiculares en estas masas arbóreas, en comparación con los sistemas de las áreas de matorrales y pastizales. Para que se identifiquen afecciones en la vegetación es necesario que se produzcan episodios de sequía de gran severidad y duración, que supongan pérdidas de humedad a mayor profundidad. En este sentido, se puede comprobar que en uno de los sectores de menor pluviometría, donde se concentran estos bosques de coníferas (montes de Zuera), la relación entre ΣNDVI y SPI no es significativa a las escalas temporales cortas, sin embargo, considerando la escala temporal de 24 meses la relación es positiva y altamente significativa. Ya que se trata de una masa forestal ubicada en el centro del valle, donde las condiciones de estrés hídrico

son muy superiores, es lógico que la influencia de las sequías sea más nítida que en los pinares de las altas Cinco Villas o en los bosques de los puertos de Beceite, donde la pluviometría es más abundante y regular, y donde se ha comprobado que los valores térmicos ejercen una notable influencia sobre la productividad final.

figura 72

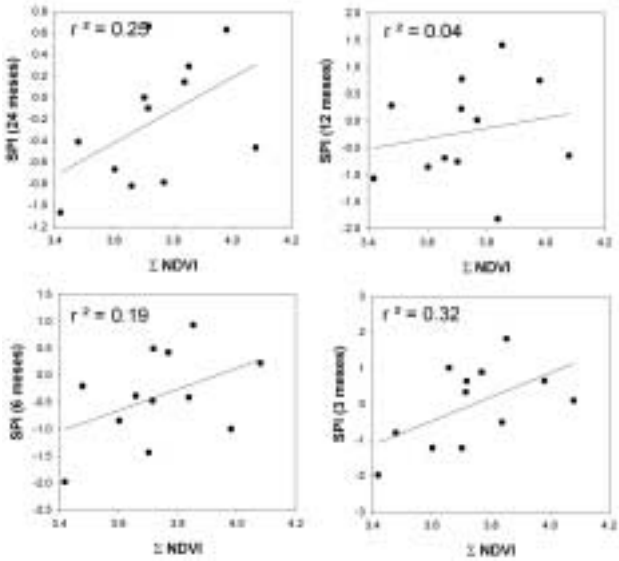
RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS PINARES DE ZUERA.



Así pues, en general se puede señalar que existe una importante respuesta de los valores integrados anuales de NDVI respecto a los índices de sequía. Además, las correlaciones varían significativamente en función de las diferentes cubiertas vegetales y las escalas temporales consideradas. En general, las áreas de bosques van a estar más condicionadas por los valores de los índices de sequía de mayor escala temporal (24 meses). Al igual sucede con las áreas de matorrales y pastizales, mientras que en las zonas de cultivos herbáceos de secano tendrán un peso superior las condiciones de sequía del año en curso, aunque la correlación con el índice de sequía a la escala temporal de 24 meses también resulte significativa en muchos casos. Además, independientemente del tipo de cubierta, las áreas ubicadas en el sector central se verán más influidas por las sequías que los sectores septentrional o meridional, donde la humedad es más abundante y la aridez

figura 73

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS PINARES DE LAS ALTAS CINCO VILLAS.

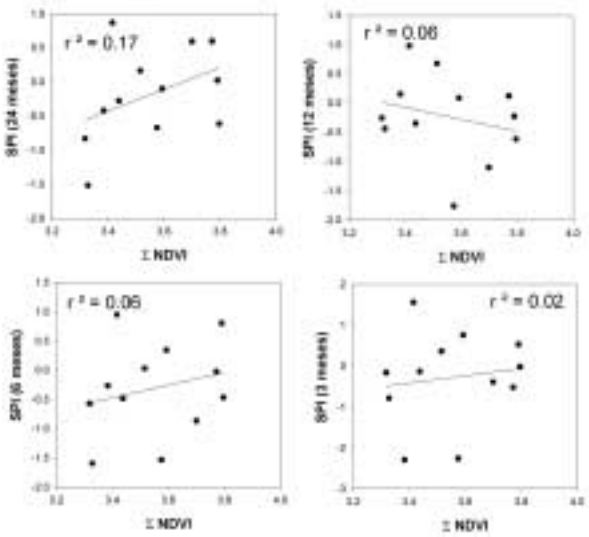


inferior. En este sentido, Bennie y Hensley (2001) han indicado que en las áreas climáticas subhúmedas, con precipitaciones anuales que excedan los 800 mm, la viabilidad económica de las explotaciones y la sostenibilidad de los recursos naturales es fácil de mantener. En cambio, en las áreas de bajas precipitaciones (< 600 mm), para mantener condiciones comparables de producción será necesaria una mayor extensión y prácticas más conservativas, debido al mayor riesgo y menor productividad de los cultivos, tal como sucede en las zonas centrales del valle del Ebro.

Con relación a la elevada influencia del SPI a la escala de 24 meses, debemos señalar que Nicholson *et al.* (1998) también han comprobado que en una región árida como el Sahel, la vegetación no se recupera totalmente de un episodio seco hasta un año después de que las precipitaciones se normalizan. En este caso la vegetación es dominantemente herbácea, por lo que no son de esperar daños fisiológicos en los que sea necesario un tiempo de recuperación de la vegetación con adecuadas condiciones de humedad. Esta explicación podría resultar más adecuada en las áreas de bosques o matorrales. Pero, dada la gran heterogeneidad de la cubierta vegetal en el valle del Ebro, y la

figura 74

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ΣNDVI Y LOS DE SPI, A LAS DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES, EN LOS PINARES DE LOS PUERTOS DE BECEITE.



convivencia de especies herbáceas y arbustivas en los mismos sectores, la resolución utilizada (1 km que se reduce por la aplicación de los filtros espaciales de ventana 3 x 3) puede resultar insuficiente para detectar estos impactos diferenciales.

Cabe también plantear una hipótesis, con relación a la mayor respuesta de las áreas de matorrales y pastizales a los índices de sequía de amplia escala temporal: en un año seco la producción final de semillas de las especies herbáceas es inferior a la de un año de condiciones pluviométricas normales (Sheperd, *et al.,* 2002), por lo que puede ser necesario que se registre un año de adecuada pluviometría para que el banco de semillas del suelo se incremente y permita, al año siguiente, si las condiciones pluviométricas son adecuadas, un adecuado desarrollo de la vegetación herbácea. En este sentido, Leport *et al.* (1999), en un análisis sobre la influencia de las sequías sobre la producción de semillas en las especies arbustivas de climas mediterráneos, comprobaron que el descenso de la humedad del suelo reduce entre un 50 y un 80 % la producción final de semillas. Este hecho debe suponer una limitación importante para la obtención de un adecuado tapiz vegetal al año siguiente, aunque las condiciones de humedad resulten adecuadas. En el caso de los cultivos de secano las semillas las aporta el hombre, aspec-

to que reforzaría la explicación de que, en este caso, las correlaciones sean también altas con el SPI a la escala temporal de 12 meses.

Los resultados obtenidos a escala global por algunos autores, en el análisis de la relación existente entre el NDVI y las condiciones climáticas, también parecen confirmar los resultados obtenidos en el sector central del valle del Ebro. Potter y Brooks (1998) indicaban que a escala global los principales factores que condicionan la dinámica vegetal son la disponibilidad de calor y humedad a lo largo de todo el año, en mayor medida que las situaciones experimentadas en determinados meses del año y que las condiciones anómalas del año anterior. Sin embargo, estos autores, al igual que Goward y Prince (1995), señalaron que en los ecosistemas más marginales y de situaciones hídricas más limitantes, el NDVI puede verse afectado por las condiciones climáticas del año previo, debido a la menor capacidad de la vegetación para recuperar su estado inicial tras producirse una perturbación.

En este sentido, Wang *et al.* (2003) han comprobado en las regiones centrales de EE.UU. como incluso en las áreas de cultivos de secano altamente tecnificadas, en las que la intervención antrópica es muy alta, las condiciones hídricas a una escala temporal amplia determinan, de forma importante, la actividad vegetal y las producciones finales. A partir de análisis de humedad del suelo, éstos autores comprueban que son principalmente los niveles de humedad del suelo, al inicio de las etapas de crecimiento, los que determinan los valores posteriores de NDVI. Estos niveles de humedad estarán condicionados por las precipitaciones anteriores, lo que denota la influencia de las escalas temporales más amplias en la agregación de las condiciones hídricas.

Además, hay que contar con que otros factores pueden condicionar la producción potencial, como la historia de las explotaciones agrícolas y su gestión, o el pastoreo. También el tipo de vegetación y la erosión del suelo en los años anteriores pueden condicionar el desarrollo potencial de la biomasa vegetal, y afectar las relaciones entre las sequías y la actividad vegetal (Ashcroft *et al.,* 1990). En el sector central del valle del Ebro se ha comprobado que incluso la profundidad del laboreo condiciona la retención posterior de agua por parte del suelo y las producciones de las áreas de cereal (López y Arrúe, 1997).

Especialmente las áreas de agricultura de secano dependen del uso eficiente del agua, y las decisiones de los agricultores relacionadas con los tipos de cultivo o las prácticas agrícolas que conducen a la conservación de la humedad del suelo podrán ser muy

diferentes. Por ejemplo, las rotaciones de cultivos y el sistema de múltiple cultivo, que incluye dos o más tipos de cultivo en una misma parcela, son prácticas para explotar la humedad del suelo a diferentes profundidades (Varvel, 1994). Este aspecto puede influir en la dinámica vegetal, el NDVI y, por tanto, en la influencia de las sequías.

Así pues, el aprovechamiento y la dependencia respecto al agua, y la influencia de las sequías en los cultivos dependerá también de aspectos muy locales, espacialmente relacionados con las prácticas agrícolas, lo que dificulta todavía más la determinación del impacto de las condiciones de sequía, de forma general, en el conjunto del área de estudio.

La complejidad de la identificación de estos impactos también puede resultar alta en las áreas boscosas. Otros factores como las temperaturas, las características inherentes a cada especie, la edad de los árboles, etc., pueden confundir los efectos de las sequías en un determinado periodo y pueden servir para disminuir o amplificar sus impactos. En este sentido, Lagergren y Lindroth (2002), en un análisis sobre la influencia del déficit de agua en el suelo en la transpiración de diferentes especies arbóreas, comprobaron que la respuesta individual de diferentes especies a los déficits hídricos varía enormemente, como consecuencia de las características de conductividad y absorción de agua, así como de las ratios de agua transpirada.

7.2. Factores que condicionan las diferencias espaciales en la influencia de las sequías

Se ha comprobado que la incidencia de las sequías sobre los valores anuales de NDVI es muy contrastada entre los diferentes usos del suelo, pero también que dentro de un mismo uso del suelo se registran diferencias significativas, que parecen relacionadas con la localización geográfica y los importantes contrastes pluviométricos que tienen lugar.

En general, ya se ha comentado que las áreas de vegetación que se ubican en sus límites ecológicos de distribución resultan más vulnerables respecto a la variabilidad climática (Fritts, 1976). Diferentes trabajos han comprobado que es en los espacios de menor cubierta vegetal, sometidos a condiciones climáticas más extremas, donde la respuesta de la vegetación a las condiciones climáticas resulta superior. Este aspecto ha quedado registrado en diferentes regiones áridas y semiáridas del mundo. La cubierta vegetal dominante en estos espacios es arbustiva o herbácea, con sistemas radiculares poco

desarrollados que no permitirán amortiguar prolongados déficits hídricos, por ello serán espacios con elevadas variabilidades interanuales en el NDVI (Milich y Weiss, 1997), muy sujetos a la disponibilidad hídrica en el suelo. Reed (1993) analizó la incidencia de las sequías en Kansas (EE.UU.) por medio del NDVI, confirmando que son las áreas de pastizales y matorrales las que presentan las mayores diferencias entre los años secos y húmedos, lo que supone que existe una mayor vulnerabilidad de estos espacios ante las condiciones de sequía.

En esta sección se analiza la interrelación existente entre las diferencias espaciales en la influencia de las sequías sobre la productividad vegetal anual, las características pluviométricas y térmicas, y las condiciones generales de la vegetación (producción anual media y su variabilidad). Este aspecto nos permitirá establecer unas hipótesis explicativas acerca de la desigual incidencia de las sequías dentro del área de estudio.

Para ello se comprueba la interacción existente entre los estadísticos que determinan la relación entre el SPI y los valores anuales de ΣNDVI (valores del coeficiente de correlación r) y la distribución térmica y pluviométrica, además de los valores medios y los coeficientes de variación de la actividad vegetal de forma interanual. El análisis se realiza tanto en el conjunto del área de estudio como en los diferentes usos del suelo.

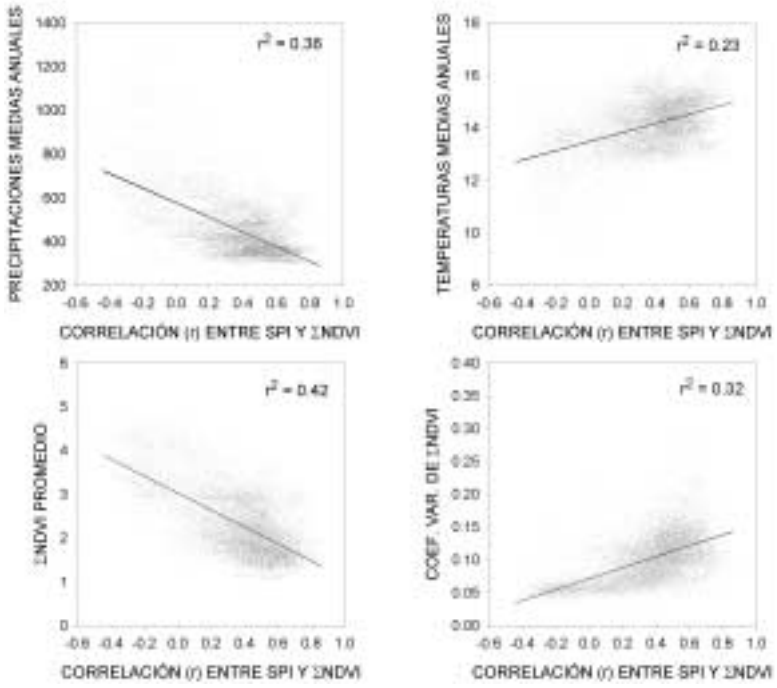
En la figura 75 se indica la relación existente entre la distribución espacial del coeficiente r entre ΣNDVI y SPI (se ha seleccionado el valor de SPI a la escala temporal de 12 meses en el año en curso para determinar la influencia general de un año seco) y la distribución espacial de las precipitaciones y temperaturas medias, así como la del promedio de ΣNDVI y el coeficiente de variación interanual de este parámetro. En esta figura queda perfectamente patente que la influencia de las sequías varía de forma importante en función de las características climáticas donde se localiza la cubierta vegetal, y también en función de las propias características intrínsecas de esta cubierta.

Las áreas que reciben mayores precipitaciones medias no muestran una influencia tan significativa de las sequías como la que se registra en las áreas más secas. Al contrario sucede con las temperaturas, con una relación positiva, de tal forma que las áreas más cálidas coinciden también con los espacios en los que la influencia de las sequías resulta superior. Estos espacios más vulnerables se ubican en los sectores centrales del valle, en los que se registran las menores precipitaciones y las más altas temperaturas, así como las principales condiciones de sequedad y aridez del valle del Ebro (Cuadrat, 1999). Fruto de la aridez dominante, los espacios del centro del valle corresponden a áreas en

las que se registra una baja productividad vegetal y su variabilidad es alta debido a las condiciones limitantes (bajas precipitaciones y elevadas tasas de evapotranspiración). En estos espacios, el umbral de descenso de precipitación que producirá consecuencias negativas sobre la vegetación será inferior al de las regiones más septentrionales. Todos estos aspectos incidirán en que existan pocas posibilidades de desarrollo vegetal o productivo de estos espacios.

figura 75

DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN ENTRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPI (12 MESES EN MAYO) Y EL ΣNDVI Y LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL NDVI INTEGRADO ANUAL (ΣNDVI). CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO EXCEPTO LAS ÁREAS DE CULTIVOS DE REGADÍO.



Las consecuencias de esta elevada vulnerabilidad pueden ser muy importantes. Además, la ya de por si importante limitación productiva de estos espacios, y su vulne-

rabilidad ambiental, podrían acentuarse como consecuencia de un aumento de la recurrencia de severos episodios de sequía, que podrían romper el frágil equilibrio existente entre el clima y la vegetación, y dar lugar a acusados procesos de degradación. Además, en el caso de los cultivos de secano, la gran dependencia climática de este sistema productivo se traducirá en una elevada vulnerabilidad económica, que pone en peligro la vida de muchas explotaciones.

Hay que señalar que las relaciones existentes entre la influencia de las sequías y las características climáticas y vegetales en el conjunto del área de estudio podrían estar sesgadas por la distribución espacial de los diferentes usos del suelo. Sin embargo, si se analiza la correlación en los diferentes usos del suelo se puede comprobar una respuesta similar en todos los casos, produciéndose una correlación negativa y estadísticamente significativa entre la relación sequías – producción vegetal y las precipitaciones medias (Tabla 20). Entre los aspectos diferenciables destacar que la correlación es mucho más robusta en las áreas de vegetación natural (matorrales, pastizales y bosques) que en los cultivos de secano.

Lo mismo sucede en el caso de las temperaturas, con correlaciones positivas en todos los casos, pero inferiores en los cultivos herbáceos de secano, y no significativas en los secanos permanentes. En el caso de la correlación con los valores de ΣNDVI promedio, y con su variabilidad, las áreas de bosques de frondosas, de menor cubierta vegetal, y con mayor variabilidad interanual, están más determinadas por las condiciones de sequía. Pero lo mismo sucede, aunque la asociación sea menor, en el resto de las cubiertas, excepto en los cultivos permanentes de secano. En este caso, las importantes diferencias en la cubierta vegetal que se producen dentro de esta categoría, con viñedos, olivares y algunos sectores de almendros, dificulta el establecimiento de una respuesta homogénea. Por ejemplo, la cubierta foliar de los olivares es mayor que la de los viñedos y se mantiene durante más tiempo, de tal forma que la producción de biomasa vegetal es superior en los sectores de olivares. Sin embargo, éstos se localizan en un área de importantes limitaciones hídricas (Bajo Aragón) y superior aridez al área donde se ubican las áreas de viñedos (Campo de Cariñena), por lo que esta relación positiva bien puede ser debida a las diferencias en el tipo de cultivo entre unas y otras áreas.

Así pues, en esta sección se ha comprobado que existen marcadas diferencias espaciales en la influencia de las sequías dentro del área de estudio. Se ha indicado que la influencia difiere en función de la escala temporal de análisis de los índices de sequía y, también, de las distintas cubiertas y usos del suelo, siendo más afectadas, de forma

tabla 20

CORRELACIÓN ENTRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DE CORRELACIÓN ENTRE EL SPI (12 MESES EN MAYO) Y EL ΣNDVI Y LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS, PROMEDIO Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN DEL NDVI INTEGRADO ANUAL (ΣNDVI) EN LOS USOS DEL SUELO MÁS REPRESENTATIVOS DEL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (p < 0.01). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (p<0.05)

Usos del suelo	Precipitaciones medias anuales	Temperaturas medias anuales	SNDVI	C.V. SNDVI
Cultivos de secano (herbáceas)	-0.30**	0.34**	-0.48**	0.39**
Cultivos de secano (permanentes)	0.15*	0.02	0.33**	0.01
Bosques de frondosas	-0.62**	0.50**	-0.72**	0.78**
Bosques de coníferas	-0.59**	0.46**	-0.63**	0.43**
Matorrales y pastizales	-0.62**	0.48**	-0.63**	0.57**

general, las áreas de cultivos, matorrales, pastizales y bosques de coníferas que se ubican en el centro de la depresión, donde las condiciones climáticas naturales resultan más limitantes, la productividad media es muy baja y la variabilidad interanual de los valores de SPI resulta superior.

Los resultados obtenidos en el sector central del valle del Ebro coinciden con lo señalado en amplias regiones del mundo, en las que se sostiene que las áreas más afectadas por el clima coinciden con las comunidades vegetales que se localizan en sus límites de distribución espacial, con unas duras condiciones climáticas que limitan el desarrollo de la vegetación.

En este caso, se comprueba que las áreas que reciben menores precipitaciones muestran menor productividad vegetal y, de forma general, mayor variabilidad interanual en los valores de NDVI. Es en estos sectores donde la dinámica vegetal, independientemente del tipo de cubierta, está más influida por las condiciones climáticas generales y, en concreto, por las sequías. Se trata de sistemas naturales degradados, que con condiciones climáticas medias apenas pueden desarrollarse y avanzar hacia etapas de mayor madurez (Braun-Blanquet y Bolós, 1957), por lo que cuando se produzca una sequía sufrirán de forma más intensa sus consecuencias.

Así pues, aunque las sequías puedan afectar a todos los espacios, aparecer en cualquier estación y ejercer efectos devastadores en cualquier región del mundo (Wilhite, 2000), nuestra experiencia en el sector central del valle del Ebro permite señalar que las áreas más húmedas presentan una menor vulnerabilidad a las sequías, y las consecuen-

cias de este fenómeno en estos espacios son inferiores sobre el descenso de actividad o producción vegetal.

Hasta el momento se han comprobado los desiguales efectos de las sequías, en función de las escalas temporales analizadas, de los distintos usos del suelo y de la localización geográfica. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los efectos de las sequías pueden variar en función de la estación del año, debido a las diferencias existentes en las necesidades de agua por parte de la vegetación natural. En la siguiente sección se analizan diferencialmente dichos efectos, mediante el análisis espacial de la influencia de las sequías en cada uno de los meses del año. Con ello se completa el análisis general sobre los efectos de las sequías en los valores de NDVI, desde una perspectiva espacial, en el sector central del valle del Ebro.

7.3. Influencia de las sequías sobre la actividad vegetal a lo largo del año

Anteriormente se ha analizado la influencia de las sequías climáticas sobre la producción vegetal anual en el sector central del valle del Ebro. Los resultados son lo suficientemente indicativos del diferente papel de las sequías considerando la diversidad de cubiertas y usos del suelo en el área de estudio. Sin embargo, el diferenciado papel de las sequías puede ser todavía más contrastado en función del periodo de tiempo en el que el déficit hídrico tenga lugar.

Este aspecto ha sido escasamente contemplado en la bibliografía hasta el momento pues, de forma general, se ha centrado en el análisis de valores anuales o de meses concretos en los que la actividad vegetal resulta mayor (p. ej., Nicholson *et al.,* 1990; Maseli *et al.,* 1993). No obstante, un análisis dinámico puede revestir un mayor interés en los planes de previsión o alerta temprana de las sequías, ya que la identificación de los periodos más vulnerables puede permitir concentrar la atención, o los recursos, en determinados periodos del año y en determinadas áreas. Hanson y Weltzin (2000) señalaron que en las áreas frecuentemente afectadas por sequías los cambios desproporcionados en las precipitaciones recibidas en un determinado mes o estación pueden llegar a tener un mayor impacto en la productividad y supervivencia de la vegetación que similares descensos repartidos homogéneamente a lo largo del año debido a que las precipitaciones regulares y bien distribuidas temporalmente tienden a limitar la severidad de la sequía. Ji y Peters (2003) han comprobado una mayor relación entre el SPI y el NDVI durante los momentos centrales del periodo vegetativo de los cultivos, mientras que infe-

riores correlaciones son registradas al comienzo y final de la fase de crecimiento en las regiones cerealísticas de EE.UU.

Debido al interés de considerar, no sólo los espacios, sino los momentos del año en los que la vulnerabilidad respecto a las sequías resulta superior, se ha analizado la respuesta en cada uno de los meses del año. En las figuras 76 y 77 se resumen los resultados mensuales (ver detalles espaciales en Vicente-Serrano, 2004). Para el conjunto de los usos del suelo se ha comprobado que entre los meses de enero y septiembre se produce una significativa asociación entre NDVI y SPI en las áreas de cultivos de secano, y en los matorrales y pastizales. Los bosques de coníferas en su conjunto muestran menores correlaciones que los anteriores usos durante los meses primaverales e invernales y la influencia del SPI sobre el NDVI en los bosques de frondosas llega a ser incluso negativa.

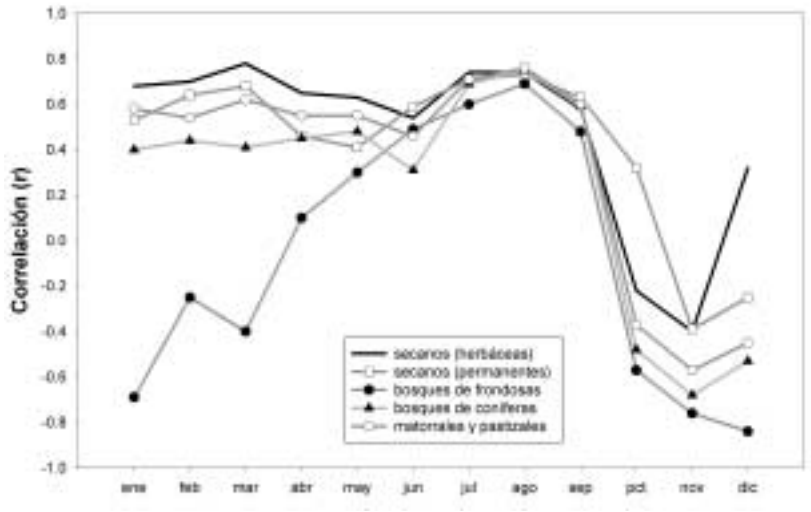
Durante los meses estivales (junio, julio y agosto) es cuando se registran los valores de correlación más elevados, y en este caso se producen escasas diferencias entre los distintos usos del suelo. La sequedad dominante y las altas temperaturas presentes durante esta estación condicionarán que la cantidad de humedad que conserve el suelo determine, de forma más importante, las posibilidades de desarrollo de la vegetación.

Durante el otoño las correlaciones descienden considerablemente en todos los usos, resultando incluso, predominantemente negativas. En diciembre comienzan a incrementarse los valores de correlación, sobre todo en las áreas de cultivos de secano, aspecto explicado por el inicio de la germinación de los cereales en determinadas áreas agrícolas del valle.

Sin embargo, al considerar la misma cubierta del suelo, pero en diferentes localizaciones geográficas, se ha podido comprobar el desigual comportamiento del NDVI respecto a los valores de SPI. Estos resultados coinciden con los señalados en otras regiones semiáridas del mundo. Por ejemplo, Yang *et al.* (1998) observaron diferentes respuestas del NDVI, en distintos tipos de pastizales, respecto a similares condiciones de humedad en las llanuras centrales de EE.UU. Igualmente, Davenport y Nicholson (1993) indicaron en el este de África una mayor respuesta del NDVI a las precipitaciones en las formaciones vegetales ubicadas en las áreas más secas. Estos autores señalaron que ello puede estar condicionado por la forma en que la vegetación hace uso de los recursos hídricos disponibles. La mayor eficacia se daría en las formaciones herbáceas y arbustivas, mientras que es inferior en las formaciones forestales y en las regiones más húmedas.

figura 76

MÁXIMA CORRELACIÓN ENTRE NDVI Y SPI CADA MES EN LOS USOS DEL SUELO MÁS REPRESENTATIVOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.



En la figura 77 se comprueba que tanto en los cultivos de secano, en las áreas de matorrales y pastizales y en los bosques de coníferas la respuesta de la vegetación a la ocurrencia de sequías puede ser muy contrastada. En las áreas de cultivos de secano, a lo largo de la primavera y los primeros meses estivales, las sequías afectan, en mayor medida, a la vegetación ubicada en los espacios de condiciones más áridas, en el centro de la depresión, mientras que en las áreas más húmedas (Hoya de Huesca) las sequías muestran menor influencia.

Lo mismo sucede en las áreas de matorrales y pastizales. El NDVI de los ubicados en el sector más septentrional del área de estudio presenta una baja respuesta a las sequías durante buena parte de la primavera y el invierno, siendo únicamente significativa dicha respuesta durante los meses estivales.

Así pues, las diferencias espaciales señaladas a escala anual también se reconocen al explicar la actividad vegetal en los diferentes meses del año. La influencia de las sequías es superior durante los meses en los que las condiciones térmicas son favorables para la adecuada actividad vegetal, sobre todo en primavera y verano, en los momentos en los que las necesidades hídricas son mayores, por lo que será durante estas estacio-

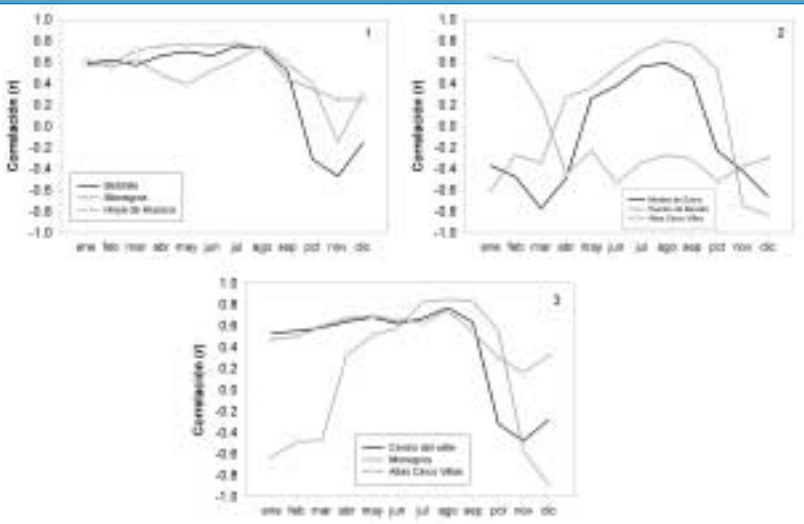
nes cuando las diferentes formaciones vegetales serán más vulnerables a la ocurrencia de sequías.

Además de estos resultados generales, se ha comprobado que en la mayor parte de las ocasiones el NDVI del mes en curso está más condicionado por los índices de sequía de meses anteriores, lo que supone un retardo en la respuesta de la vegetación respecto a las condiciones de sequía. Este hecho ha sido documentado en multitud de trabajos en otras regiones áridas o semiáridas del mundo, donde se ha comprobado que en muchas ocasiones el NDVI está mejor correlacionado con la precipitación total de los meses anteriores, que con las precipitaciones únicas del mes en curso (Nicholson *et al.,* 1990; Millington *et al.,* 1994; Yang *et al.,* 1997).

Di *et al.* (1994) analizaron la relación entre las precipitaciones y el NDVI en la región de Nebrasca (EE.UU.) y también señalaron la importancia de los retardos temporales en la respuesta de la vegetación a las precipitaciones. A su vez, Henricksen y Durkin (1986) indicaron en África una elevada correlación entre un índice de balance hídrico y las curvas anuales de NDVI, con un retardo aproximado de 5 semanas, siendo mayor la respuesta vegetal a los déficits que a los excesos del balance hídrico.

figura 77

MÁXIMA CORRELACIÓN ENTRE NDVI Y SPI CADA MES EN ÁREAS REPRESENTATIVAS. 1: CULTIVOS HERBÁCEOS DE SECANO, 2: BOSQUES DE CONÍFERAS, 3: MATORRALES Y PASTIZALES.



Schultz y Halpert (1995) señalan que a escala global existe una baja correlación entre el NDVI y las precipitaciones, e indican que el promedio de correlación se incrementa al utilizar un retardo de 1 mes, que atribuyen al tiempo que tarda la vegetación en responder a los cambios de humedad del suelo. Igualmente, Schultz y Halpert (1993) mostraron que el NDVI correlaciona mejor con los valores de 2-3 meses de precipitación acumulada. Igualmente, Liu y Kogan (1996) comprobaron una relación superior entre las precipitaciones y el NDVI en Brasil considerando retardos en torno a 1 o 2 meses, y Nicholson y Farrar (1994) indicaron también un retardo en torno a 2 meses entre la fenología del NDVI y las precipitaciones en las regiones semiáridas de África.

La capacidad del suelo para retener agua posibilita estos retrasos en la respuesta de la vegetación. En el sector central del valle del Ebro se ha mostrado que es en los meses primaverales y estivales cuando el retardo en la respuesta resulta superior en tiempo. Es en estos momentos cuando se produce la mayor demanda de agua por parte de las plantas, y un desarrollo normal de la vegetación será posible en función de cómo haya sido la recarga del suelo en los meses anteriores.

Además, se ha comprobado que las diferencias en los tipos de vegetación y las condiciones climáticas o geográficas en las que se ubican las diferentes formaciones vegetales determinan los contrastes espaciales en la influencia de las sequías. La escala espacial de análisis no permite diferenciar aspectos más concretos, pero será de esperar que la forma de los sistemas radiculares y los sistemas de captación de agua afecten a la eficacia con que la vegetación hace uso del agua, lo que determinará también la desigual influencia de las condiciones de sequía. Igualmente, factores geográficos como la fertilidad del suelo, la retención de agua, la topografía y la gestión antrópica afectarán en el posible impacto de los déficits hídricos, pero para ello son necesarias otras escalas más detalladas de análisis que la que permiten las imágenes AVHRR.

7.4. Identificación y seguimiento de las sequías a partir de índices de vegetación. Comparación con los indicadores climáticos

Un seguimiento espacio-temporal mensual continuo de las condiciones de sequía no resulta viable por medio del NDVI, ya que la diversidad geográfica en las formaciones vegetales dificulta tanto la comparabilidad espacial como temporal. En áreas de gran heterogeneidad de usos del suelo, el NDVI es generalmente más alto en las áreas de con-

diciones geográficas más favorables (clima, suelo y ecosistemas más productivos) que en las áreas de peores condiciones ambientales.

A pesar de que algunos autores han utilizado determinados umbrales de NDVI para el seguimiento continuo de las condiciones de sequía [por ejemplo, Liu y Massambini (1994) utilizan el umbral de NDVI < 0.22 para identificar la ocurrencia de sequías en Brasil] se trata de un criterio no válido en espacios de elevada variabilidad temporal y espacial de la cubierta vegetal, como el sector central del valle del Ebro, ya que un umbral determinado puede corresponder a condiciones de baja actividad vegetal relativa en determinadas áreas (p.ej. en los bosques de frondosas), pero corresponder a una elevada actividad en otros sectores (p.ej. en las áreas esteparias de vegetación herbácea y arbustiva).

Por ello, para el análisis espacialmente continuo de las situaciones de sequía, el NDVI presenta algunas limitaciones. Se ha comprobado que es un buen indicador para identificar daños en los cultivos y condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, cuando se trata de extrapolar los resultados a áreas no homogéneas y realizar cartografías espacial y temporalmente continuas de los daños en la cubierta vegetal se plantean innumerables problemas (Kogan, 1990). Por ello, en el análisis espacial, especialmente para determinar el impacto del clima sobre la vegetación en áreas no homogéneas, es necesario estratificar los valores de NDVI, y eliminar así las posibles diferencias relacionadas con condiciones ambientales específicas.

Algunos autores utilizan métodos sencillos para la identificación continua de los impactos de las sequías mediante imágenes de satélite. Para ello se puede partir de sencillos análisis visuales (Henricksen, 1986) o de diferencias entre imágenes de varios años (Reed, 1993; Lozano-García *et al.,* 1995). Esta aproximación fue la considerada por González-Alonso *et al.* (1995) al analizar las condiciones de sequía en 1993, mediante imágenes AVHRR en el conjunto de la Península Ibérica. Tucker y Choudhury (1987) también utilizaron simplemente diferencias interanuales de NDVI para identificar espacios con cambios (descensos de vegetación) que pudieran ser atribuidos a la ocurrencia de sequías.

Sin embargo, Kogan (1990) propuso un filtro geográfico para el análisis espacial y temporal continuo de las condiciones en la vegetación. El filtro geográfico elimina la proporción de la variabilidad espacial del NDVI relacionada con la contribución de las características geográficas o vegetales de una región. Una aproximación simple sería cal-

cular las diferencias de NDVI respecto a su media en cada punto del espacio, pero eso presenta una importante limitación, relacionada con la escasa longitud de las series de NDVI, aspecto que impide obtener unas medias fiables, así como el ajuste a una distribución de probabilidad determinada.

A pesar de ello, algunos trabajos han analizado las condiciones de la vegetación por medio de la estandarización de los valores de NDVI. Por ejemplo, Gutman e Ignatov (1995) utilizaron datos estandarizados de NDVI para detectar las anomalías anuales de la vegetación en Europa. Igualmente, Maseli *et al.* (1992) procedieron a una estandarización de los valores de NDVI en el Sahel por medio del *z-score index*, a pesar de utilizar únicamente 5 años de datos.

Peters *et al.* (2002) realizaron un seguimiento de la vegetación y las sequías en EE.UU. utilizando una estandarización (*z-score index*) de las series temporales de índices de vegetación, asociando el índice obtenido con una distribución de probabilidad normal, que permite determinar estadísticamente la frecuencia de los registros. Sin embargo, a pesar de la utilidad de esta aproximación, ésta presenta varios problemas, ya que se asume la normalidad de unas series con muy escasos registros. En su caso 12 años, en el nuestro 14, aspecto que limita el adecuado ajuste de los datos a una determinada distribución de probabilidad. Peters *et al.* (2002) señalan que esta aproximación resulta de gran utilidad, y que el área afectada por sequías, tomando como referencia la cubierta vegetal, coincide de forma general con la identificada mediante los índices de sequía climáticos.

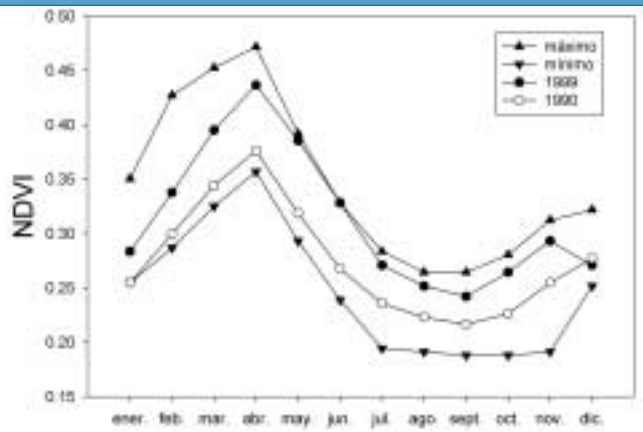
Igualmente, Hartmam *et al.* (2003) han utilizado una estandarización de los valores de NDVI mensuales para determinar las condiciones de sequía en Argentina, pero únicamente usando 5 años de registros. Aún así, obtienen una buena relación con las condiciones climáticas, detectándose condiciones de menor actividad vegetal los años de menores precipitaciones.

A pesar de estos ejemplos, consideramos que no resulta una aproximación adecuada, dada la escasa longitud de los registros disponibles, y creemos más adecuado establecer una proporción con relación a los máximos y mínimos de NDVI observados en cada serie, siguiendo la aproximación propuesta por Kogan (1990), ampliamente validada y utilizada, en diferentes regiones del mundo, para el seguimiento de las sequías.

La figura 78 indica conceptualmente la base de esta proporción y su utilidad con relación al análisis de las sequías. Se ha seleccionado un píxel de cultivos de secano en Monegros donde se indican los valores máximos y mínimos mensuales de NDVI registrados a lo largo de la serie histórica disponible. También se indica el comportamiento de los valores de NDVI en dos años, entre los que se han producido diferentes condiciones climáticas. Los valores máximos y mínimos mensuales pueden considerarse como los extremos de la actividad vegetal interanual. El valor máximo se asocia a unas condiciones de actividad vegetal óptimas, mientras que el mínimo de cada mes se asocia a condiciones ambientales que limitan la actividad vegetal.

figura 78

CURVAS DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN UN PÍXEL CORRESPONDIENTE A CULTIVOS DE SECANO EN MONEGROS (1987-2000), ASÍ COMO LAS CURVAS DE DOS AÑOS ESPECÍFICOS.



Hay que tener en cuenta que aunque la actividad vegetal está determinada por diferentes condicionantes ambientales (litológicos, edáficos, topográficos, climáticos), la mayor parte de ellos son estables y no varían lo suficiente en el tiempo como para poder ser identificados como los causantes de la importante variabilidad interanual del NDVI. De esta forma, el principal factor que presenta una elevada variabilidad temporal será el clima, a partir del cual se podrán explicar, esencialmente, las variaciones interanuales. También hay que considerar que las intervenciones antrópicas u otro tipo de fenómenos naturales (por ejemplo plagas) pueden condicionar dichas variaciones interanuales. Sin embargo, en el primer caso las principales transformaciones que se han registrado están

relacionadas con la puesta en marcha de áreas de regadío, que están perfectamente definidas espacialmente y en las que los límites máximos y mínimos no pueden ser asociados a variaciones de carácter climático. En el caso de las plagas, éstas son mucho menos escasas y, a menudo, están relacionadas con condiciones climáticas extremas debido a la mayor vulnerabilidad de la vegetación.

Por estas razones, se asume que la variabilidad interanual en los espacios en los que no se han producido importantes transformaciones antrópicas estará determinada, fundamentalmente, por la variabilidad en las condiciones climáticas.

Existirá, pues, en dichas curvas anuales de vegetación, un componente propio de los ecosistemas, que determina unos valores promedio de NDVI en cada uno de los meses del año, mientras que el componente climático determinará cómo se producen las fluctuaciones en dicha curva anual. Los máximos y mínimos mensuales de NDVI, calculados con un número suficiente de años en los que se han producido diferentes condiciones climáticas, pueden ser utilizados como criterio para cuantificar las condiciones extremas a las que se ha visto sometida la vegetación. Cada ecosistema tendrá su propia signatura (curva) temporal en término de valores de NDVI, forma de la curva, tasa de cambio, etc., pero ya que las curvas que suponen el máximo y el mínimo se asocian a condiciones climáticas óptimas y desfavorables, respectivamente, el área que queda entre ambas curvas aproximaría el componente climático del NDVI de cada ecosistema.

Así pues, el NDVI que se registra en cada espacio tendrá un componente ecológico relacionado con las características de la cubierta vegetal que lo conforma, y tendrá un componente climático que determinará el rango interanual de variación en la cubierta vegetal (Kogan, 1995). El rango comprendido entre el mínimo y el máximo temporal de cada píxel será, realmente, dicho componente climático.

El componente climático de los ecosistemas es de menor cuantía que el componente asociado al ecosistema, por ello debe ser separado. Kogan (1995) indicó que la banda de fluctuación del NDVI asociada al componente climático en las regiones de abundante vegetación es menor que en las áreas de menor cubierta vegetal, por ello, los impactos climáticos sobre la vegetación en estos sectores no serán fácilmente detectables con las series de NDVI. En este sentido, Schmidt y Gitelson (2000) comprobaron que el componente climático en los valores de NDVI es muy distinto entre diferentes espacios, climas y comunidades vegetales. Estos autores analizaron un transecto espacial en Israel y mostraron que las diferencias $NDVI_{min}$-$NDVI_{max}$ son mayores en las áreas con

vegetación de carácter mediterráneo que en las áreas de transición entre los espacios de clima semiárido y mediterráneo. Además, también comprobaron que la magnitud de este componente varía entre las diferentes estaciones del año, siendo menor durante la estación seca.

Para detectar la incidencia de las sequías sobre la vegetación y permitir una comparación espacio-temporal, el componente climático del NDVI debe ser destacado (Kogan, 1990). Para ello, los valores de NDVI de cada píxel y periodo de tiempo (semanas, meses,...) son escalados linealmente entre 0 (Mínimo NDVI) y 100 (Máximo NDVI), obteniendo un parámetro (VCI, *Vegetation Condition Index*) que se define según (Kogan, 1990):

$$VCI = 100\frac{(NDVI - NDVI_{MIN})}{(NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN})}$$

Donde *NDVI* es el índice de vegetación en un píxel en un momento determinado (en nuestro caso mensual), $NDVI_{MIN}$ es el mínimo histórico en ese mes y $NDVI_{MAX}$ es el máximo para el mismo mes del año. Este indicador aproxima el componente relacionado con las condiciones climáticas, desde condiciones de la vegetación extremadamente desfavorables a condiciones óptimas.

El NDVI refleja la contribución de los aspectos climáticos y de las características geográficas en la actividad vegetal, mientras que el VCI solamente muestra la contribución del clima. Por ello, el VCI permite comparar espacialmente el efecto de los impactos climáticos entre áreas cercanas con diferentes características geográficas y vegetales, y permite la comparación entre diferentes meses del año, lo que es muy importante cuando se utiliza este índice para el seguimiento de las sequías.

El VCI permite comparar los impactos climáticos sobre diferentes tipos de vegetación. Los valores de VCI indican cuanto ha avanzado o retrocedido la actividad vegetal en respuesta a las condiciones climáticas y en qué posición está la capacidad vegetal con relación a sus límites ecológicos.

La utilidad del VCI fue puesta de manifiesto por Kogan (1995) para el seguimiento de los impactos de las sequías sobre la vegetación natural, pudiendo medir su intensidad, duración y extensión superficial. Además, este autor no sólo detecta las

sequías de carácter general (espacialmente) o aquellos episodios extremos, sino que también se identifican sequías más localizadas en el espacio y de menor duración.

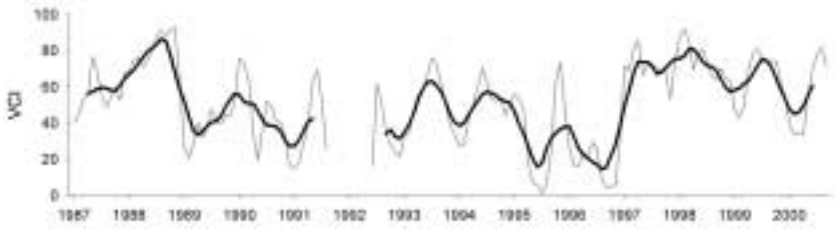
Este mismo autor (Kogan, 1998 y 2001) ha mostrado la utilidad del VCI en la identificación y el seguimiento de las sequías a escala global. Los análisis concretos en EE.UU., la antigua URSS, Argentina, Etiopía o China muestran que se trata de un indicador que permite detectar las condiciones vegetales independientemente del tipo de cubierta y de la región del mundo en la que nos encontremos. El método ha sido validado con datos convencionales de producciones agrícolas, mostrando su potencialidad para el diagnóstico de la producción, permitiendo, además, una detección de las sequías más temprana (entre 1 y 2 meses) que mediante la utilización de determinados indicadores climáticos. Por ejemplo, Seiler *et al.* (2000) indicaron elevadas relaciones entre las producciones agrícolas en la Pampa argentina y los valores de VCI en determinados meses del año ($r^2 = 0.86$), registrando elevadas cosechas en años de altos valores de VCI, y comprobando que más del 80 % de la variabilidad interanual de las producciones llega a ser explicada por el VCI. El VCI ha sido utilizado para determinar la incidencia de las sequías y las condiciones vegetales del trigo en primavera en Kazakhstan (Gitelson *et al.,* 1996), del algodón en China (Kogan, 1998), la cebada en el sur de Rusia (Kogan, 1998). Además, McVicar y Jupp (1998) utilizan el VCI para el seguimiento de las sequías en Australia, Unganai y Kogan (1998) en Sudáfrica, González-Alonso *et al.* (2001) en España, Groten (1993) en Burkina-Faso, Gitelson *et al.* (1998) en Kazakhstan, Hayes y Decker (1996), Wannebo y Rosenzweig (2003) en los cinturones de cereal de EE.UU. y Liu y Kogan (1996) en Brasil, por lo que se trata de un indicador de amplia difusión y aceptado por la comunidad científica internacional.

En la figura 79 se muestra la evolución temporal de las condiciones de sequía, en la cubierta vegetal y el conjunto del área de estudio mediante la utilización del VCI. La línea gris muestra los valores promedio en el conjunto del área de estudio (exceptuando las áreas de regadío), mientras que la línea negra indica el resultado de la aplicación de una media móvil de 7 meses.

Hay que tener en cuenta que las variaciones temporales son muy importantes en la serie, pasando de meses en los que la vegetación se encuentra en condiciones de óptima actividad a otros en los que las condiciones relativas son de baja actividad. A pesar de ello, la serie filtrada permite identificar los patrones generales de comportamiento temporal en la totalidad del área de estudio. Los primeros años (1988 y 1989) muestran condiciones óptimas de actividad vegetal en la mayor parte de los meses, registrándose

figura 79

EVOLUCIÓN DEL VCI EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO (EXCEPTUANDO LOS REGADÍOS). LA LÍNEA NEGRA REPRESENTA UN FILTRO DE PASO BAJO DE 7 MESES.



un incremento hasta valores próximos al 100 % en otoño de 1988. A partir de 1989 se produce un considerable descenso en las condiciones relativas de actividad vegetal, que se prolonga hasta inicios de 1997. El periodo es de gran variabilidad temporal, con incrementos y descensos en la actividad vegetal relativa. A partir de 1997 se produce otro periodo de mayor actividad vegetal en el que las variaciones temporales no son tan bruscas. El contraste entre las condiciones del año 1996 y las de 1997 son muy significativas, produciéndose un salto desde una escasa actividad vegetal, hasta valores superiores al 80 % en apenas dos meses.

La curva que expresa la media móvil muestra, de forma más clara, la evolución general de la actividad vegetal en la que se comprueba el importante contraste entre las condiciones de los años 1995 y 1996 y los siguientes 4 años (1997-2000).

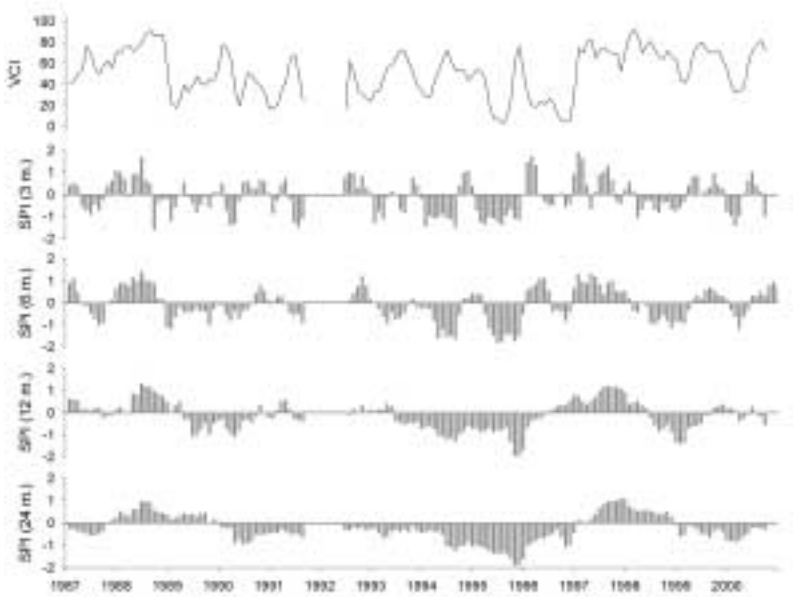
En la figura 80 se muestra la evolución del VCI y del SPI a diferentes escalas temporales en el conjunto del área de estudio. La correlación entre las series es contrastada en función de la escala temporal del SPI. A la escala de 3 meses la correlación es de $r = 0.18$ ($p < 0.05$), sin embargo, dicha correlación se incrementa a las escalas temporales de 6 ($r = 0.26$, $p < 0.01$) y 12 meses ($r = 0.23$, $p < 0.01$), pero sobre todo a la de 24 meses ($r = 0.50$, $p < 0.01$). La evolución temporal de la actividad vegetal relativa parece responder, pues, en mejor medida a los patrones generales de evolución reflejados a la escala de 24 meses, con un amplio periodo, entre 1990 y 1996, con valores negativos de SPI, coincidente con un descenso generalizado del VCI. La correlación no resulta superior debido a las importantes variaciones de alta frecuencia que se registran en el VCI respecto al SPI a la escala temporal de 24 meses. En general, estas variaciones de alta fre-

cuencia responden mejor a las variaciones temporales en los índices de sequía a las escalas temporales de 3 y 6 meses.

Se podría señalar, pues, una respuesta continua de las condiciones relativas de actividad vegetal en el conjunto del área de estudio, que responden a los patrones más generales de sequedad. Pero la evolución temporal de dicha actividad vegetal resulta mucho más variable, pudiendo verse afectada por cortos episodios de sequía o por condiciones húmedas, tal como se comprueba en 1992 y 1996 en el caso de las condiciones húmedas; y en el invierno del año 2000 en el de las condiciones secas.

figura 8o

EVOLUCIÓN DEL VCI Y EL SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO (EXCEPTO LAS ÁREAS DE REGADÍOS)



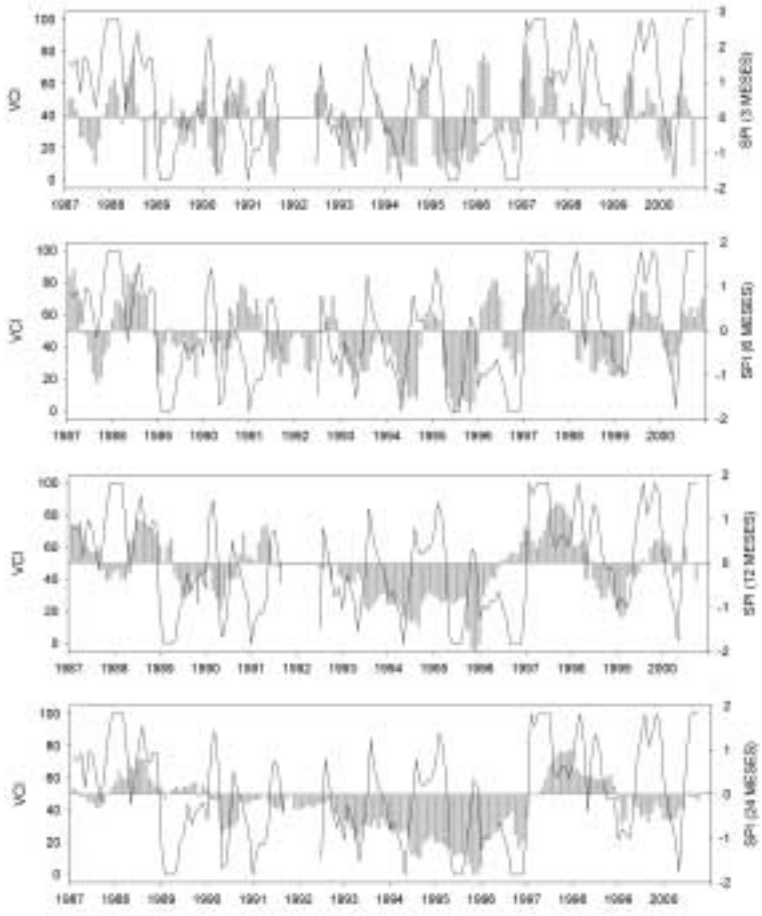
Sin embargo, estos patrones generales de evolución temporal y, consecuentemente, la relación existente entre el VCI y los índices de sequía a diferentes escalas temporales, pueden resultar muy contrastados en función de los usos del suelo o, incluso, de

la localización de las diferentes cubiertas dentro del sector central del valle del Ebro. Para ilustrar esto, en las figuras 81 a 84 se muestra, como ejemplo, la evolución del VCI y del SPI a las escalas temporales de 3, 6, 12 y 24, en 3 puntos representativos de la diversidad vegetal en el área de estudio.

En la figura 81 se indica la evolución en un píxel correspondiente a cultivos de secano en Monegros. En este sector se muestra una importante variabilidad temporal en

figura 81

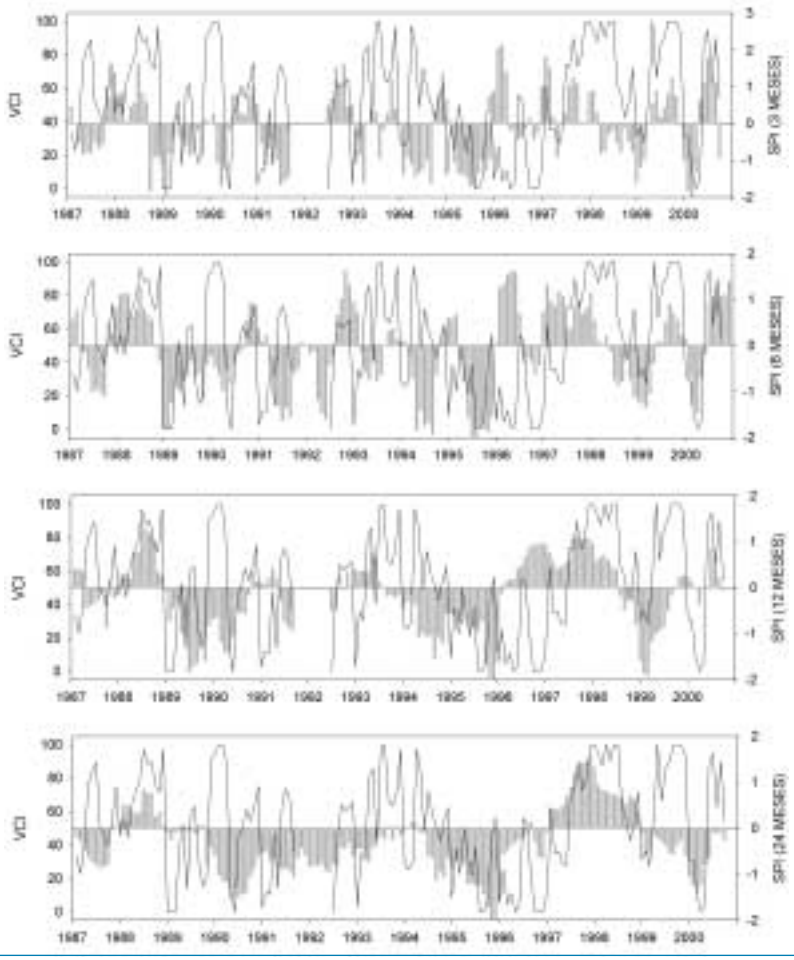
EVOLUCIÓN DEL VCI Y EL SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN UNA ZONA DE CULTIVOS DE SECANO EN MONEGROS.



las condiciones relativas de la cubierta vegetal. Los patrones temporales en la actividad vegetal siguen la evolución de los índices de sequía a la escala temporal de 24 meses, con momentos más prolongados de elevada actividad vegetal durante los años en los que el SPI registra valores positivos, como sucede a finales de la década de 1990, mientras que entre 1989 y 1996 el descenso en la actividad relativa es patente, coincidiendo con el periodo de sequías más duraderas.

figura 82

EVOLUCIÓN DEL VCI Y EL SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN UNA ZONA DE CULTIVOS DE SECANO EN LA HOYA DE HUESCA.



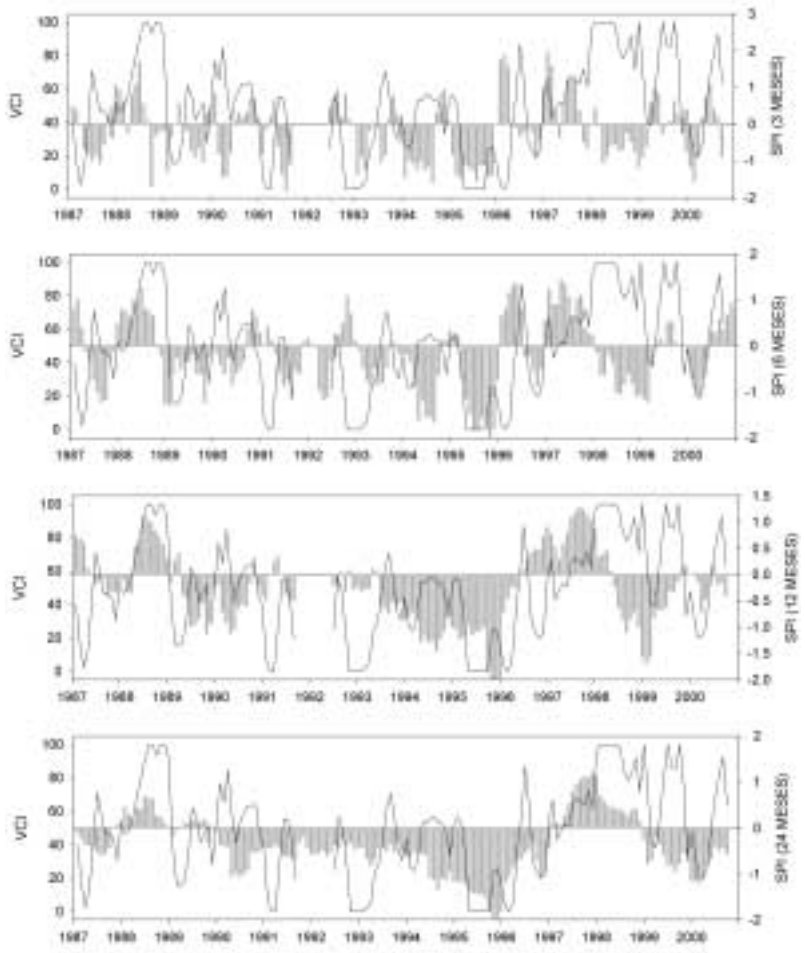
No obstante, las variaciones de alta frecuencia y las fuertes oscilaciones en las condiciones de actividad vegetal que se registran durante estos dos periodos más amplios (el primero seco y el segundo húmedo) responden, de forma preferente, a las variaciones de los índices de sequía de menor escala temporal (3 y 6 meses), tal como se muestra en los abruptos descensos registrados en 1990, 1993, 1994, 1995, 1998 y 2000, en los que el descenso en la actividad vegetal coincidió con sequías severas o extremas a la escala temporal de 3 meses.

En la figura 82 se muestra la evolución en un píxel correspondiente a cultivos de secano en la Hoya de Huesca. En este caso las oscilaciones temporales son inferiores. La compartimentación en tres periodos generales reflejados por los índices de sequía: húmedo (finales de la década de 1980) – seco (primera mitad de la década de 1990) – húmedo (segunda mitad de 1990) resulta más complicada a partir del VCI en este sector, ya que entre 1993 y 1995 y entre 1990 y 1991 se asiste a condiciones relativas favorables. A pesar de ello, el comportamiento responde bien a los patrones temporales de los índices de sequía, quedando explicados, sobre todo, por una complementación de las escalas temporales de 6 y 24 meses, la primera explicando la mayor parte de las variaciones de alta frecuencia, mientras que la segunda explicaría los patrones generales de evolución temporal.

En la cercana sierra de Alcubierre (Figura 83), en cambio, el píxel representativo de los bosques de coníferas experimenta una respuesta mayor a los patrones temporales de las sequías de gran escala temporal (24 meses). La variabilidad temporal es más baja que en los sectores analizados de cultivos. El mayor desarrollo de los sistemas radiculares en estos espacios arbóreos respecto a las herbáceas y arbustivas anteriormente consideradas dará lugar a una captación de agua en el suelo a mayor profundidad que los matorrales y pastizales. Ello permitiría hacer frente a las sequías de corta duración. Estos bosques se verán afectados, en mayor medida, por la persistencia de las condiciones secas, cuando las sequías sean prolongadas, debido a la dureza del medio donde se asientan, donde las precipitaciones son bajas y el sustrato litológico permite acumular poco agua.

figura 83

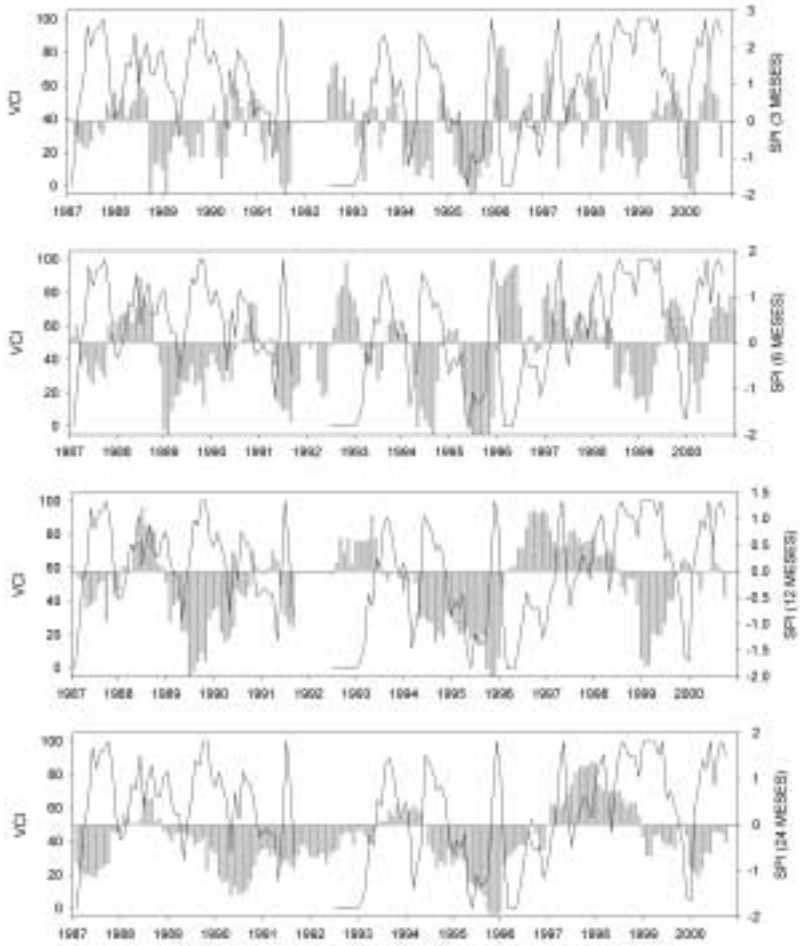
EVOLUCIÓN DEL VCI Y EL SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN UNA ZONA DE CONÍFERAS EN LA SIERRA DE ALCUBIERRE.



Finalmente, el sector de bosques de frondosas representado (Figura 84) es indicativo de la escasa relación existente entre los valores de VCI y los de SPI a cualquier escala temporal. Únicamente a lo largo de 1995 se registran bajas condiciones relativas en la actividad vegetal, coincidentes con valores negativos de SPI a las escalas de 12 y 24 meses. Los mayores aportes pluviométricos que reciben estas áreas, y la mayor capaci-

figura 84

EVOLUCIÓN DEL VCI Y EL SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN UNA ZONA DE BOSQUES DE FRONDOSAS EN EL PREPIRINEO.



dad del suelo para retener agua producirán esta menor vulnerabilidad de la vegetación respecto a las condiciones de sequía.

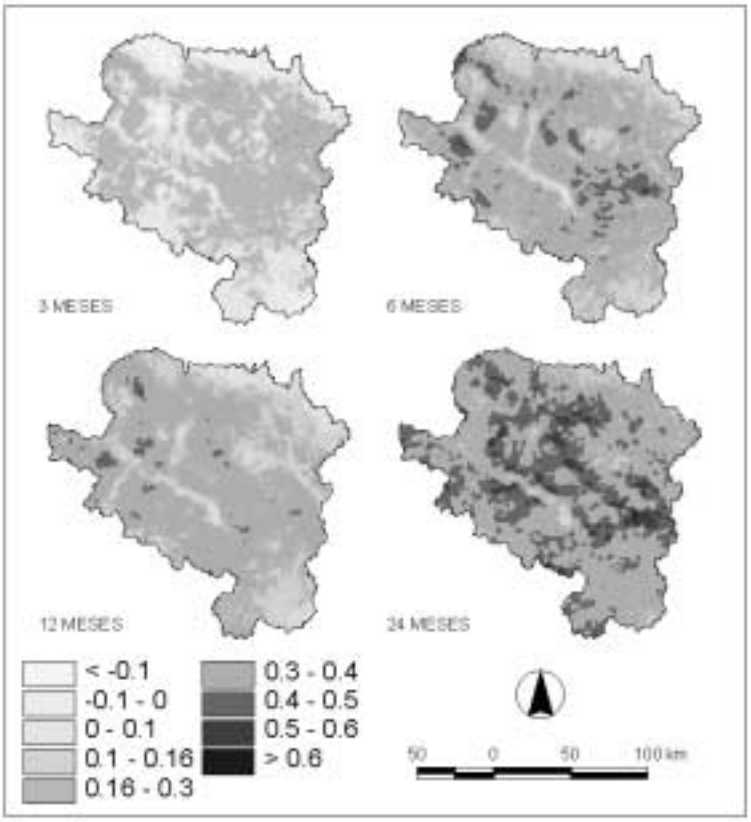
El análisis en la totalidad de los píxeles del área de estudio permite obtener los patrones generales de influencia de las sequías a diferentes escalas temporales. En la figura 85 se muestra la distribución espacial del coeficiente de correlación existente entre

las series temporales de VCI, en cada uno de los píxeles del área de estudio, y las series temporales del SPI a las escalas temporales de 3, 6, 12 y 24 meses. Las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se fijan en un valor de $r = 0.16$, tanto positivo como negativo.

Los resultados más notables son la comprobación de que un importante porcentaje del área de estudio muestra correlaciones positivas y estadísticamente significativas entre los índices de sequía climáticos y el VCI. No obstante, las diferencias espaciales, y los contrastes entre los índices de sequía a unas y otras escalas temporales son patentes.

figura 85

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES TEMPORALES DE VALORES DE VCI Y DE SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES EN EL CONJUNTO DEL ÁREA DE ESTUDIO. CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA, R = 0.16, P < 0.05.



A la escala de 3 meses amplias áreas del sector central del valle muestran correlaciones positivas y significativas, aunque en la mayor parte de los casos no resultan muy robustas. A pesar de ello, la diferenciación espacial resulta ser muy clara. Las áreas con correlaciones no significativas coinciden con los sectores de bosques de frondosas y coníferas ubicados en el sector prepirenaico. Igualmente sucede en el sur, donde en los extremos sudoriental y occidental, en los que la cubierta boscosa es dominante, tampoco se registran correlaciones estadísticamente significativas entre ambos indicadores. En el centro del valle son las áreas de cultivos de regadío, así como las áreas de bosques de coníferas, los espacios en los que la asociación no resulta significativa. Frente a ello, la práctica totalidad de cultivos de secano, matorrales y pastizales, tanto del centro del valle como de las áreas más septentrionales (Hoya de Huesca, altas Cinco Villas) muestran correlaciones significativas.

Los valores de correlación se incrementan considerablemente utilizando el SPI a la escala temporal de 6 meses. Los patrones espaciales son similares, pero los valores de correlación se incrementan en todos los espacios. Además, debemos señalar que en las áreas de vegetación arbórea y en los cultivos de regadío las correlaciones siguen sin ser significativas estadísticamente, mientras que en los cultivos de secano, matorrales y pastizales se incrementan de forma notable con relación a lo señalado a la escala de 3 meses.

A la escala temporal de doce meses los patrones espaciales se mantienen, e incluso se reducen ligeramente las correlaciones, si bien, siguen siendo los espacios del centro del valle los que indican coeficientes más altos, manteniéndose la mayor influencia de las condiciones de sequía en áreas de matorrales, pastizales y cultivos de secano.

Finalmente, a la escala temporal de 24 meses, la práctica totalidad de píxeles muestran correlaciones significativas y positivas que son muy robustas ($r > 0.6$) en amplios sectores del centro del valle. De nuevo son los cultivos de regadío y los bosques de coníferas y frondosas ubicados en el Prepirineo los espacios en los que la asociación resulta inferior.

Los resultados concuerdan con los obtenidos a partir de las series anuales o mensuales de NDVI, donde los ecosistemas naturales y cultivos ubicados en las áreas más áridas del valle responden en mayor medida a las condiciones de sequía. Sin embargo, en este caso las series temporales son continuas y se ha podido comprobar que son los patrones generales de sequía, que se reconocen a la escala temporal de 24 meses, los

que explican en mayor medida la evolución de las condiciones relativas de actividad vegetal en gran parte del área de estudio. Además, se produce una mayor respuesta en las áreas de menos cubierta vegetal, ubicadas en los espacios más áridos, con relación a los índices de sequía de menor frecuencia temporal (sobre todo a la escala de 6 meses). Este aspecto es indicativo de una mayor vulnerabilidad de estos espacios respecto a las sequías, ya que están afectados por las condiciones generales de sequedad que se experimentan a lo largo de amplios periodos de tiempo, y también por sequías de más corta duración.

Se comprueba, pues, que las diferencias espaciales en la influencia de las sequías climáticas sobre la dinámica de la vegetación están muy condicionadas por la distribución de los diferentes usos del suelo. A continuación se analiza la respuesta en una serie de áreas representativas, correspondientes a los usos del suelo con mayor superficie en el sector central del valle del Ebro (cultivos de secano, matorrales y pastizales y bosques de coníferas), y que ya han sido considerados con anterioridad. En la tabla 21 se muestran los valores de correlación entre las series temporales de VCI y las de SPI a diferentes escalas temporales en estas mismas áreas.

En general, se comprueba que es en las áreas de matorrales y pastizales más áridas donde la correlación existente entre el SPI y el VCI resulta superior, a cualquier escala temporal de análisis. Lo mismo sucede en las áreas de cultivos herbáceos de secano. Sin embargo, en los sectores de bosques de coníferas las únicas correlaciones significativas se registran entre el VCI y el SPI a la escala temporal de 24 meses. En todos los casos, las correlaciones son más robustas considerando escalas temporales amplias, mientras que las escalas temporales más cortas no influyen en la dinámica temporal de la vegetación de forma continua en los bosques de coníferas.

Anteriormente, se ha señalado que los bosques muestran, en general, una mayor respuesta a las escalas temporales amplias de los índices de sequía, y que ello podría estar motivado por el mayor desarrollo de sus sistemas radiculares, que les permitirá hacer frente a déficit hídricos de corta duración. No obstante, se verían afectados por los periodos secos de más larga duración, ya que no podrían amortiguar déficits hídricos prolongados.

La evolución temporal de la cubierta vegetal muestra cambios de alta frecuencia, comprobando que las variaciones pueden ser muy bruscas a lo largo del tiempo. A ello contribuirán, por ejemplo, eventos pluviométricos de gran intensidad, episodios fríos o

muy cálidos, etc., es decir, factores climáticos que repercuten sobre las condiciones en las que se encuentra la vegetación. Además, hay que contar también con la actuación humana (fechas de cosecha, siembra, sistemas de cultivo) y no sólo en las áreas de cultivos. En los espacios de vegetación natural, el pastoreo o los incendios forestales pueden dar lugar a estos cambios de alta frecuencia.

tabla 21

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE VCI Y SPI (ESCALAS TEMPORALES DE 3, 6, 12 Y 24 MESES) EN DIFERENTES SECTORES REPRESENTATIVOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

	SPI (3 meses)	SPI (6 meses)	SPI (12 meses)	SPI (24 meses)
Secanos herbáceos (Monegros)	0.27**	0.40**	0.28**	0.50**
Secanos herbáceos (Hoya de Huesca)	0.25**	0.25**	0.23**	0.41**
Secanos herbáceos (Belchite)	0.18*	0.35**	0.30**	0.42**
Pinares (montes de Zuera)	-0.17*	-0.04	0.09	0.40**
Pinares (Altas Cinco Villas)	-0.11	0.01	0.22**	0.45**
Pinares (Beceite)	-0.1	-0.13	-0.19**	0.05
Matorrales y pastizales (centro del valle)	0.14	0.30**	0.36**	0.52**
Matorrales y pastizales (Monegros)	0.20**	0.35**	0.32**	0.56**
Matorrales y pastizales (Altas Cinco Villas)	-0.07	0.01	0.21**	0.41**

Así pues, en general se produce una gran coincidencia entre la variabilidad de la actividad de la vegetación en el área de estudio y el comportamiento de los índices de sequía a diferentes escalas temporales. Además, las fases en las que la coincidencia es menor se producen tras severos episodios de sequías climáticas, por lo que se podría plantear la hipótesis de que los daños en la cubierta vegetal se prolongan en el tiempo una vez terminada la sequía. Además, la respuesta de la vegetación a los índices de sequía no se registra a una única escala temporal. En diferentes periodos los bajos valores de VCI coinciden con índices de sequía de diferentes escala temporal, lo que es indicativo de lo complejo que es identificar los impactos de las sequías climáticas. Se podría considerar la respuesta combinada de la vegetación a déficits hídricos de diferente escala temporal. En algunos momentos se produce una gran coincidencia con los valores del índice a una escala temporal de tres meses, mientras que en otros años los daños en la cubierta vegetal coinciden con situaciones de sequía identificadas por medio de índices de menor frecuencia temporal, sobre todo a la escala de 24 meses. No obstante, se ha constatado que, en muchas ocasiones, la coincidencia espacial es escasa. La gran variabilidad espacial que introducen las diferentes cubiertas y usos del suelo supone que haya

formaciones vegetales distintas, que pueden responder de manera contrastada a los déficits hídricos de diferente magnitud o duración.

Así pues, se comprueba que las sequías condicionan, de forma determinante, el desarrollo y dinámica de la vegetación en el área de estudio, con contrastadas diferencias espaciales en función de los usos del suelo y de la aridez de cada sector. Por ello, es posible que de producirse un recrudecimiento de las condiciones de sequedad en el sector central del valle del Ebro, tal como indican algunos modelos climáticos (Jones *et al.,* 1996), se podría asistir a procesos de degradación y a una reducción de la cubierta vegetal. En este sentido, Nicholson *et al.* (1998) indican que muchas de las áreas en las que se asiste a procesos de degradación coinciden con espacios en los que, simultáneamente, se han producido graves episodios de sequía. Por ello, se podría plantear que en un paisaje tan alterado por el hombre como es el sector central del valle del Ebro, el sistema puede ser más vulnerable a la variabilidad climática y a las sequías.

valoración del impacto de las sequías sobre las producciones agrícolas

8. valoración del impacto de las sequías sobre las producciones agrícolas

En el sector central del valle del Ebro la variabilidad pluviométrica introduce una gran incertidumbre en las producciones agrícolas de secano, cuyos totales están muy relacionados con las precipitaciones recibidas (Martí, 1992; Alberto y Machín, 1978; McAneney y Arrúe, 1993). En el capítulo anterior hemos comprobado que en el sector central del valle del Ebro la dinámica vegetal está muy determinada por la evolución temporal de las condiciones de sequía. Además, sus efectos se dejan sentir predominantemente en aquellas áreas ubicadas en los sectores más áridos y de menor pluviometría, y en los que los cultivos de secano representan un importante porcentaje superficial.

La determinación de las relaciones existentes entre las producciones agrarias y las condiciones climáticas es un elemento importante para el pronóstico del rendimiento de los cultivos (Frère y Popov, 1986). El clima influye en la productividad agrícola mediante efectos en el desarrollo de los cultivos, en su índice de área foliar, y en las tasas de fijación de carbono. De todos los elementos, el agua es el más determinante para el desarrollo de los cultivos, siendo el factor que condiciona la actividad y la fisiología de la vegetación en regiones semiáridas. Hay que tener en cuenta que la disponibilidad de agua no sólo afecta al desarrollo fisiológico de la vegetación, sino que su carencia puede ser la causa de efectos indirectos, como enfermedades o plagas, que pueden reducir la productividad y la calidad de la misma. Además, las necesidades van a ser diferentes en función de los cultivos y de las estaciones del año (Doorenbos y Pruitt, 1976).

Diferentes trabajos han cuantificado la influencia de las sequías sobre el rendimiento de los cultivos, fundamentalmente en las regiones de escasa y variable pluviometría. Por ejemplo, en las llanuras centrales de Canadá, Quiring y Papakryiakou (2003) han comprobado que las producciones anuales de cereal están íntimamente relacionadas con las condiciones de sequía. Akinremi *et al.* (1996) también comprobaron que en las llanuras canadienses las tendencias en las producciones de trigo coinciden con la experimentada por el índice de Palmer. En esta misma región, Chipanshi *et al.* (1999) mostraron la dependencia pluviométrica de las producciones cerealísticas, que son elevadas los años de mayor pluviometría y se producen pérdidas en las cosechas los años de sequías más significativas. En EE.UU. las producciones de los cultivos de cereal también

están fuertemente condicionadas por la ocurrencia de sequías (Kunkel *et al.,* 1999; Karl y Koscielny, 1982; Handler, 1990; Changnon y Easterling, 1989). Yamoah *et al.* (2000) indicaron correlaciones significativas entre las producciones agrícolas y el SPI en Nebrasca, aunque las áreas más condicionadas por las sequías se localizan en los grandes cinturones cerealísticos, dentro de las llanuras centrales de EE.UU. (Hayes *et al.,* 1999).

En las regiones semiáridas de Australia, Keating y Meinke (1998) comprobaron que las producciones de sorgo y trigo están relacionadas linealmente con las precipitaciones que se reciben durante las fases de crecimiento de la vegetación. Igualmente, Barron *et al.* (2003) han determinado, en las regiones semiáridas del este de África, que la ocurrencia de rachas secas de larga duración implica una significativa reducción de las cosechas de maíz. En el ámbito mediterráneo, Péchoux (1977) comprobó los importantes efectos de las sequías en Chipre, que producen pérdidas totales de la producción en los cultivos de secano durante los años más secos.

El número de estudios realizados en las regiones semiáridas es innumerable. Sin embargo, la influencia de las sequías sobre las producciones agrícolas de secano no sólo se reduce a las regiones áridas y semiáridas. En regiones de climas húmedos y fríos, las sequías también influyen significativamente en las producciones agrícolas (p. ej., Olesen *et al.,* 2000). Chmielewski y Köhn (1999) analizaron la influencia de las condiciones climáticas sobre las producciones de cereal de primavera (cebada) en el norte de Alemania. Estos autores mostraron que las precipitaciones recibidas en primavera tienen un peso positivo y similar al de otro tipo de variables térmicas que, en principio, se podría pensar que influyen en mayor medida sobre las producciones agrícolas en estos climas fríos.

En el sudeste de la Península Ibérica, Olcina y Rico (1995) analizaron las consecuencias agrícolas de la sequía que afectó a esta región entre 1992 y 1994. Estos autores comprobaron reducciones de la producción en la almendra o la vid del orden del 50 % al 60 % con relación a los años de pluviometría normal. En el sector central del valle del Ebro se han realizado algunos estudios, fundamentalmente en la zona de Monegros, donde las condiciones de aridez son muy limitantes y donde los cereales de secano constituyen la principal actividad económica. Martí (1992b) comprobó una relación lineal entre las precipitaciones anuales recogidas en diferentes municipios de Monegros y las cosechas finales de cereal (trigo y cebada) registradas. La variación en las producciones de estas áreas está causada, principalmente, por variaciones en la cantidad total y en la distribución estacional de las precipitaciones, fundamentalmente durante la fase de cre-

cimiento del cereal (Alberto y Machín, 1978; Martí, 1992). Una carencia de precipitaciones producirá condiciones de estrés en la vegetación, dando lugar a menores rendimientos. En el capítulo anterior se ha comprobado que las características pluviométricas de amplios sectores están en el limite de las necesidades de los cultivos, por lo que pequeños descensos en los totales pluviométricos pueden tener consecuencias muy negativas. Cuadrat y Gómez-Aparisi (2001) señalaron que en el episodio de sequía más reciente, entre 1991 y 1996, las consecuencias para el campo aragonés fueron desastrosas: en el año 1994 las pérdidas globales evaluadas por ASAJA fueron de 200.000 millones de pesetas por la reducción de algo más del 50 % de los cultivos de secano. En 1995, según estimaciones de las Organizaciones Profesionales Agrarias, alcanzaron los 30.000 millones de pesetas (Cuadrat y Gómez-Aparisi, 2001).

A continuación se analizan las consecuencias de las sequías sobre las producciones agrícolas en el centro del valle a partir de diferentes fuentes estadísticas, con ello se pretende una aproximación más tangible a las pérdidas económicas que se producen como consecuencia de este fenómeno.

En primer lugar, se analiza en detalle la incidencia de las sequías climáticas sobre las producciones de cereal de secano a partir de los registros disponibles de la explotación ubicada en Monegrillo. En la figura 86 se muestra la evolución de las producciones anuales (proporción de cereal cosechado frente al plantado) entre 1941 y 2000. En el caso de la producción de cebada los datos están más fragmentados temporalmente, ya que durante la década de 1960 fueron pocos los años en los que se cultivó este tipo de cereal. La variabilidad interanual es muy elevada. A lo largo de las décadas de 1940 y 1950 se comprueba una sucesión de años en los que la cosecha es nula o casi nula y otros en los que se registraron producciones muy elevadas. Esta es la dinámica temporal general observada hasta la década de 1960. A partir de este momento la variabilidad interanual en las producciones se reduce y no se registran valores tan altos como los de las décadas de 1940 y 1950. En cambio, se asiste a un claro descenso de las producciones hasta llegar a la década de 1990, en la que se suceden una serie de años de producción nula, solamente interrumpidos en 1996 y 1997. Así pues, la variabilidad interanual de la productividad agrícola, en este árido espacio, constituye el rasgo más llamativo, así como la tendencia hacia menores producciones desde la década de 1960 hasta la de 1990. Este descenso de la producción difiere con las tendencias que presentan las producciones de cereal mundialmente, donde se asiste a un incremento durante los últimos 40 años (Hafner, 2003).

Debido a la disponibilidad de estas largas series podemos analizar la relación existente entre dichas producciones y los valores de SPI en el observatorio pluviométrico de Monegrillo, ubicado en la misma explotación en la que se dispone de datos agrícolas. Esta aproximación ya ha sido llevada a cabo por otros autores. Por ejemplo, Quiring y Papakryiakou (2003) han comparado las producciones agrícolas en las llanuras cerealísticas canadienses con diferentes índices de sequía, entre ellos el SPI. Estos autores comprueban que la variabilidad espacial es elevada pero, en general, las correlaciones entre las producciones agrícolas y los índices de sequía son positivas y significativas. Igualmente, Yamoah *et al.* (2000) utilizaron el SPI para determinar la influencia del estrés hídrico y los déficits de humedad del suelo sobre las producciones agrícolas de secano en Nebrasca (EE.UU.). McKee *et al.* (1993) indican que el SPI con valores entre –0.99 y 0.99 es indicativo de condiciones normales para los sistemas de cultivo adaptados al clima de la región; mientras que valores por debajo de –1 constituyen situaciones de moderado o fuerte estrés, lo que podría causar reducción en las producciones finales.

figura 86

EVOLUCIÓN DE LAS COSECHAS DE TRIGO Y CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO. 1941-2000. DATOS EN PROPORCIÓN DE CEREAL COSECHADO RESPECTO AL PLANTADO.

Además del análisis sobre las consecuencias de las sequías, encontrar relaciones significativas entre el SPI y la producción de cereal puede servir para que los agricultores

ajusten sus planes de cosecha con suficiente antelación temporal para minimizar pérdidas y reducir costos, tal como han puesto de manifiesto Sadras *et al.* (2003) en Australia.

A partir de los datos pluviométricos de Monegrillo se han calculado los índices de sequía (SPI), desde 1941, a las escalas de 1, 3, 6, 12 y 24 meses. Se ha testado la normalidad de los datos de cosechas anuales. Los estadísticos, tanto en el caso del trigo como de la cebada, se recogen en la tabla 22, donde se comprueba que la productividad media de la cebada es superior a la del trigo, aunque su variabilidad interanual es muy superior. La cebada resiste el estrés hídrico mejor que otros cereales, por lo que se encuentra más adaptada a las condiciones hídricas del semiárido español (González *et al.,* 1999), aspecto que explica esta mayor productividad. La cebada es el principal cereal de secano en los Monegros, dejando para el trigo las áreas más favorables, con un sistema de rotación de año y vez.

tabla 22

VALORES ESTADÍSTICOS DE LAS SERIES ANUALES DE PRODUCCIÓN DE TRIGO Y CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO.

	Cebada		Trigo
N	46	n	60
Media	9.62 [+/- 2.69] al 95% de confianza	Media	6.856 [+/- 1.386 al 95% de confianza]
Desv	9.08 [+/- 1.54 al 95% de confianza]	Desv	5.36 [+/- 0.81 al 95% de confianza]
Min	0	Min	0
Max	42.4	Max	23.49

Sin embargo, si analizamos la distribución de frecuencias, tanto del trigo como de la cebada, se comprueba la falta de normalidad en los datos (Figuras 87 y 88). Se registra un importante sesgo que indica que son más frecuentes los años de productividades bajas, mientras los años con elevadas producciones son raros. Por ello, para un adecuado análisis estadístico, con la finalidad de determinar la influencia de las sequías, habrá que proceder a una transformación de los datos.

figura 87

HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS. PRODUCCIÓN DE CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO.

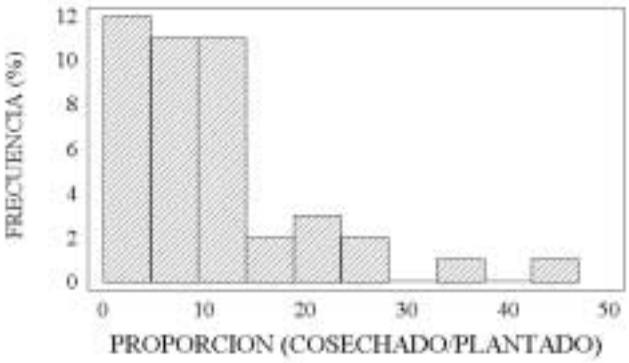
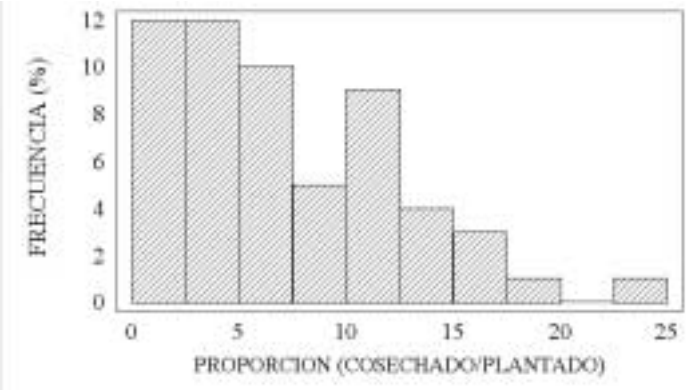


figura 88

HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS. PRODUCCIÓN DE TRIGO EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO.



Para comprobar la normalidad de las series se ha aplicado el test de Shapiro-Wilks. En ambos casos las series no resultan normales estadísticamente (Tabla 23).

Para garantizar en mayor medida la normalidad de las series se ha aplicado una transformación de raíz cuadrada a los datos originales (Hair *et al.,* 2001). Tras la transformación el test estadístico confirma la normalidad de las series (Tabla 24).

tabla 23

RESULTADOS DEL TEST DE NORMALIDAD (SHAPIRO-WILKS) PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE LAS SERIES DE PRODUCCIONES ANUALES DE CEBADA Y TRIGO EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO

	Cebada	Trigo
W	0.85	0.92
p	0	0

tabla 24

RESULTADOS DEL TEST DE NORMALIDAD (SHAPIRO-WILKS) PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE LAS SERIES DE PRODUCCIONES ANUALES DE CEBADA Y TRIGO EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO. TRANSFORMACIÓN MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA RAÍZ CUADRADA A LAS SERIES DE DATOS.

	Cebada	Trigo
W	0.97	0.98
P	0.31	0.66

A continuación se analiza la correlación de estas series con los índices de sequía (SPI) obtenidos de la serie del observatorio de Monegrillo a diferentes escalas temporales (1, 3, 6, 12 y 24 meses).

En la tabla 25 se muestran los valores de correlación entre las series mensuales de SPI, a la escala de 1 mes, y las series de producciones anuales de trigo y cebada, con la finalidad de conocer qué meses son los que condicionan, en función de sus precipitaciones, las producciones finales de trigo y cebada. Se comprueba que las mayores correlaciones se registran en los meses de diciembre y enero, por un lado, y mayo, por otro, tanto en el caso del trigo como de la cebada. En ambos casos, la mayor correlación se registra con las precipitaciones recogidas en el mes de diciembre. Hay que tener en cuenta que es en mayo cuando se produce la mayor demanda de agua por parte de ambos tipos de cereal, tanto el trigo (127 mm) como la cebada (104 mm, Martínez-Cob *et al.,* 1998), por lo que es lógico el incremento de la correlación con las precipitaciones de este mes. En cambio, la elevada correlación existente con las precipitaciones invernales no coincide con una elevada demanda de agua por parte de los cultivos (Cebada: 10 mm, Trigo: 9 mm; Martínez-Cob *et al.,* 1998). Esta elevada correlación estará relacionada con la acumulación del agua en estos meses para su posterior aprovechamiento en primavera.

Austin *et al.* (1998) comprobaron en el valle del Ebro que la respuesta de las producciones de secano a las precipitaciones es significativa considerando las precipita-

ciones de los meses entre noviembre y enero, abril y mayo. La variación de las precipitaciones en otros meses no muestra una asociación significativa con las producciones finales. En Siria, van Oosteron *et al.* (1993) señalaron que la variación en la precipitación estacional (octubre-abril) explicaba en torno al 50 % - 60 % de la varianza en la producción de grano, siendo las precipitaciones de diciembre, enero y abril las que muestran una mayor contribución a las variaciones de las cosechas. Todos estos resultados parecen indicar que es la recarga de agua durante el invierno la que condiciona la acumulación de agua en el suelo para el aprovechamiento posterior por la vegetación. McAneney y Arrúe (1993) señalaron que, en los cultivos de secano de Monegros, el mejor predictor de las cosechas finales es la lluvia acumulada entre octubre y mayo. No obstante, indican que especialmente tienen un importante papel las precipitaciones recogidas entre octubre y diciembre y las que se producen en abril, en las últimas etapas de desarrollo foliar y acumulación de materia seca. Esto está de acuerdo con las observaciones de los agricultores de la zona, que asocian abundantes lluvias en abril a adecuadas cosechas.

A la escala de tres meses las correlaciones son más robustas (Tabla 26). Tanto en el caso del trigo como de la cebada, la correlación entre la producción final obtenida y las diferentes series de SPI muestran que las precipitaciones invernales tienen una mayor influencia sobre las producciones finales de cereal, superior incluso a la de las precipitaciones de primavera. La acumulación de agua en el suelo durante el invierno será, pues, el factor que condicionará, en mayor medida, los valores finales de productividad agrícola.

La acumulación durante amplios periodos de tiempo muestra mayor influencia al explicar las producciones finales. En la tabla 27 se muestra la correlación entre las producciones anuales de trigo y cebada y los valores de SPI a la escala de 6 meses. En este caso se registran correlaciones significativas ($p < 0.01$) entre los meses de diciembre y junio, aspecto que confirma la mayor influencia de las precipitaciones acumuladas durante periodos de tiempo más amplios. En este caso las correlaciones son superiores considerando las series de SPI de marzo a mayo, que agrupan la totalidad de las precipitaciones primaverales e invernales.

tabla 25

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE SPI A LA ESCALA DE 1 MES Y LA RAÍZ CUADRADA DE LAS PRODUCCIONES DE TRIGO Y CEBADA. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.01). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.05).

SPI (1 MES)	Cebada	Trigo
Septiembre	-0.01	-0.06
Octubre	0.15	0.08
Noviembre	0.17	0.28*
Diciembre	0.54**	0.53**
Enero	0.39**	0.45**
Febrero	0.14	0.26*
Marzo	0.16	0.30*
Abril	0.23	0.30*
Mayo	0.49**	0.34**
Junio	0.09	0.01

tabla 26

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE SPI A LA ESCALA DE 3 MESES Y LA RAÍZ CUADRADA DE LAS PRODUCCIONES DE TRIGO Y CEBADA. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.01). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.05).

SPI (3 MESES)	Cebada	Trigo
Septiembre	0.05	0.01
Octubre	0.14	0.05
Noviembre	0.23	0.20
Diciembre	0.60**	0.58**
Enero	0.64**	0.71**
Febrero	0.58**	0.62**
Marzo	0.41**	0.55**
Abril	0.36**	0.48**
Mayo	0.50**	0.48**
Junio	0.47**	0.32*

tabla 27

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE SPI A LA ESCALA DE 6 MESES Y LA RAÍZ CUADRADA DE LAS PRODUCCIONES DE TRIGO Y CEBADA. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.01). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.05).

SPI (6 MESES)	Cebada	trigo
Septiembre	0.03	-0.05
Octubre	0.23	0.08
Noviembre	0.29	0.25
Diciembre	0.45**	0.42**
Enero	0.64**	0.57**
Febrero	0.62**	0.60**
Marzo	0.68**	0.73**
Abril	0.64**	0.74**
Mayo	0.66**	0.68**
Junio	0.61**	0.57**

A la escala de 12 meses las correlaciones se incrementan, sobre todos en los meses de mayo y junio, que indican una acumulación de las precipitaciones durante todo el año agrícola (Tabla 28).

tabla 28

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE SPI A LA ESCALA DE 12 MESES Y LA RAÍZ CUADRADA DE LAS PRODUCCIONES DE TRIGO Y CEBADA. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$).

SPI (12 MESES)	Cebada	Trigo
Septiembre	0.14	0.14
Octubre	0.17	0.12
Noviembre	0.19	0.14
Diciembre	0.34*	0.30*
Enero	0.45**	0.39**
Febrero	0.49**	0.46**
Marzo	0.52**	0.53**
Abril	0.68**	0.67**
Mayo	0.77**	0.75**
Junio	0.76**	0.70**

Finalmente, a la escala temporal de 24 meses las correlaciones se reducen (Tabla 29), aunque éstas siguen siendo positivas y estadísticamente significativas.

tabla 29

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE SPI A LA ESCALA DE 24 MESES Y LA RAÍZ CUADRADA DE LAS PRODUCCIONES DE TRIGO Y CEBADA. ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$).

SPI (24 MESES)	Cebada	Trigo
Septiembre	0.07	0.14
Octubre	0.11	0.12
Noviembre	0.18	0.17
Diciembre	0.27	0.26
Enero	0.40**	0.37**
Febrero	0.42**	0.40**
Marzo	0.44**	0.44**
Abril	0.47**	0.50**
Mayo	0.55**	0.56**
Junio	0.57**	0.54**

Así pues, considerando el SPI a la escala de 1 mes, las precipitaciones que tienen una mayor influencia sobre la producción final son las que se registran en los meses invernales y en primavera. Sin embargo, si agrupamos los valores pluviométricos a diferentes escalas temporales, podemos comprobar la mayor influencia de los índices de escala temporal más amplia, fundamentalmente a las escalas de 6 y 12 meses.

El tradicional sistema de cultivo en el área de estudio es la rotación barbecho-cereal. La eficacia de este sistema ha sido cuestionada en diferentes regiones, pero este sistema es ampliamente utilizado en las regiones semiáridas para facilitar la recarga de agua e incrementar las disponibilidades hídricas para los siguientes cultivos. Smika (1970), en las llanuras centrales de EE.UU., comprobó que el promedio de producción en las áreas de cultivos de año y vez son 3 veces superiores a aquellas en las que los cultivos son continuos. De esta forma el barbecho sería un sistema más estable y en el que las pérdidas de producción son menores. En los cultivos continuos comprobó que no se registran producciones el 30 % de los años. Janssen (1972) comprobó en Turquía que el agua almacenada durante el barbecho contribuye entre el 45 % y el 65 % del agua transpirada durante la cosecha.

En las regiones semiáridas del valle del Ebro la disponibilidad de agua de los cultivos es el factor más limitante para la agricultura, por lo que las reservas de agua del suelo tendrán gran importancia en el incremento y estabilización de las cosechas. Austin *et al.* (1998b) comprobaron que las precipitaciones recibidas en los últimos 3 meses de barbecho son la principal causa de variación interanual en las reservas de agua de los cultivos. A pesar de ello, estos autores señalan, a partir de un análisis de regresión mediante las producciones en los cultivos de cebada y los datos de precipitación, que en el sector central del valle del Ebro, las producciones agrícolas son superiores mediante un sistema de año y vez en un 15 % a las de los cultivos anuales. En nuestro caso, hemos comprobado que aunque las correlaciones con el SPI a la escala de 24 meses son positivas y estadísticamente significativas, son inferiores a las mostradas a la escala de 12 meses. La correlación es superior mediante el SPI del mes de mayo, que se calcula mediante las precipitaciones entre junio del año anterior y mayo del año en curso, por lo que las precipitaciones registradas durante los meses estivales y otoñales del año anterior parecen tener, también, una cierta influencia sobre las producciones agrícolas.

López *et al.* (1996) encontraron que el agua retenida en el suelo a una profundidad de hasta 80 cm durante el barbecho variaba entre –41 y +58 mm, con un promedio de sólo 12 mm. Pero McAneney y Arrúe (1993), plantean que la recarga de agua duran-

te los barbechos, aunque con un peso moderado, podría actuar como colchón hídrico, que redujera la dependencia de las producciones agrícolas respecto a las precipitaciones y disminuyendo, además, el riesgo de plagas en los cultivos. Así pues, parece que la acumulación de los valores pluviométricos durante amplios periodos de tiempo explica, en mayor medida, las producciones finales. Ello puede indicar el papel de la recarga de agua del suelo durante el otoño y el invierno del año anterior, pues considerando las precipitaciones de estos meses las correlaciones se incrementan significativamente.

En la figura 89 se muestra la relación existente entre la producción de trigo y el SPI del mes de mayo a la escala de 12 meses, que es el que mayor correlación ha mostrado con los valores de producción. Existe una relación positiva muy estrecha entre ambas variables, lo que implica una cierta influencia de las condiciones de sequía sobre las producciones finales de trigo que se han registrado en la explotación de Monegrillo.

La representación gráfica de la evolución de ambas series es indicativa de la dependencia de las producciones de trigo respecto de las condiciones de sequía. En la figura 90 se muestra la evolución temporal de ambas series (producción de trigo y SPI). Se comprueba una evolución similar en ambos casos. Hasta la década de 1960 la evolución de las producciones agrícolas en forma de dientes de sierra, con una elevada variabilidad, estuvo condicionada por la importante variabilidad interanual en las condiciones de sequía, recogida con el SPI a la escala temporal de 12 meses. El descenso de las producciones, que se registra a partir de la década de 1960, coincide con un descenso de los valores del índice de sequía de similar magnitud. Ello indica que, desde principios de la década de 1960, se asiste a un incremento de las condiciones de sequedad en este sector de Monegros, evolución que, con toda probabilidad, está en la base del importante descenso en las producciones de trigo experimentado desde esas fechas.

Si analizamos la significación de las tendencias, tanto en el caso del índice de sequía como en el de las producciones agrícolas, comprobamos que, aunque resultan negativas, no son estadísticamente significativas considerando la totalidad de la serie entre 1941 y 2000 (Tabla 30).

Sin embargo, a partir 1960, que es cuando se aprecia un mayor descenso de precipitaciones y cosechas, las tendencias en ambas variables resultan también negativas, pero en este caso estadísticamente significativas (Tabla 31). No obstante, el descenso es superior en la productividad del trigo que en los índices de sequía.

figura 89

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE SPI (MAYO) A LA ESCALA DE 12 MESES Y LAS PRODUCCIONES DE TRIGO

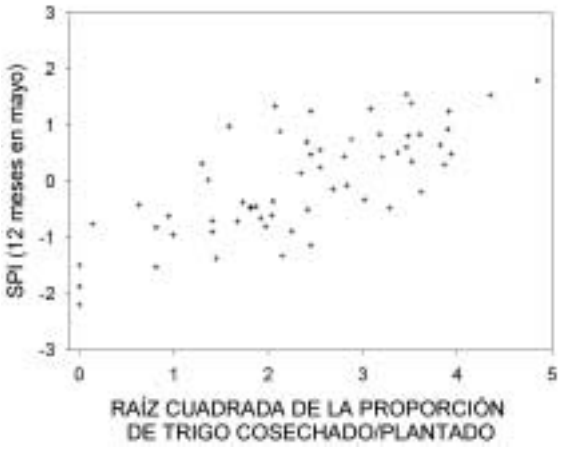


figura 90

EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA (SPI A LA ESCALA DE 12 MESES EL MES DE MAYO) Y LAS PRODUCCIONES AGRÍCOLAS DE TRIGO EN MONEGRILLO. (1941-2000)

tabla 30

TENDENCIAS EN LOS VALORES DE SPI (12 MESES EN MAYO) Y EN LAS PRODUCCIONES DE TRIGO EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO (1941-2000)

	Rho-Spearman	p
Raíz de cosechas trigo	-0.14	0.27
SPI (12 meses en mayo)	-0.11	0.41

tabla 31

TENDENCIAS EN LOS VALORES DE SPI (12 MESES EN MAYO) Y EN LAS PRODUCCIONES DE TRIGO EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO (1960-2000)

	Rho-Spearman	p
Raíz de cosechas trigo	-0.64	0.00
SPI (12 meses en mayo)	-0.45	0.00

Se ha realizado un modelo de regresión para explicar la producción de trigo a partir de los valores de SPI. Para ello se utiliza el valor del SPI, en el mes de mayo, a la escala de 12 meses. Los resultados del modelo se muestran en la tabla 32.

tabla 32

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE. VARIABLE DEPENDIENTE: PRODUCCIÓN ANUAL DE TRIGO. VARIABLE INDEPENDIENTE: SPI (12 MESES EN MAYO).

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
0.75	0.56	0.55	0.77	1.48

La expresión del modelo es:

Raíz de producción de trigo = 2.356 + 0.92SPI(mayo-12 meses).

Con ello es fácil calcular el valor estimado de SPI (mes de mayo a la escala temporal de 12 meses) para el que la cosecha sea 0: -2.56, o el valor para el que no se coseche más allá de lo plantado: -1.47. Yamoah *et al.* (2000) indican que en regiones donde las precipitaciones afectan significativamente a la productividad, el SPI proporciona una razonable estimación de la cosecha. Por ello, la estrecha relación entre productividad y SPI puede ser utilizada para la predicción de las cosechas en el sector central del valle del Ebro.

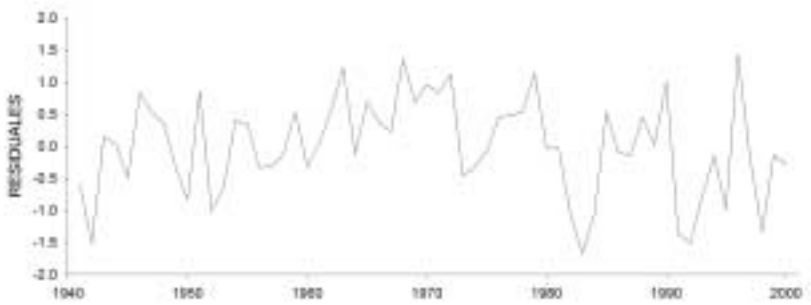
No obstante, a pesar de la relación señalada entre ambas variables, y de la buena explicación de la varianza aportada por el modelo, la predicción de las cosechas hay que realizarla con cautela. Se ha realizado una predicción anual de las producciones agrícolas mediante la aplicación del modelo y los datos de SPI. El análisis de los residuales (producciones observadas – predichas) ofrece interesantes aspectos (Figura 91). Se comprueba que los mayores errores en la estimación de las cosechas se registran en los últimos años de la serie, durante las décadas de 1980 y 1990. Además, también se comprueba que a partir de la década de 1960 se produce un descenso en dichos residuales, con una tendencia significativa en los mismos (Rho = -0.48, $p < 0.01$), de tal forma que la pre-

dicción mediante la utilización del SPI da lugar a una subestimación de las producciones de cereal, de forma dominante en los años finales.

Ello plantea interrogantes sobre las posibles causas de esta tendencia. Entre los aspectos más significativos hay que destacar que numerosos autores han puesto de manifiesto la influencia de los procesos de incremento térmico asociados al cambio climático (Jones y Moberg, 2003; Jones *et al.,* 2001), que pueden incidir en el aumento de las tasas de ETP, dando lugar a mayores pérdidas de humedad del suelo e intensificación de las sequías (Jones *et al.,* 1996). Singh *et al.* (1998) comprobaron, con la aplicación de un modelo climático que dobla las concentraciones de CO_2 actuales, que es de esperar descensos de alrededor del 30 % en determinados cultivos de cereal, como el trigo y la cebada, debido a una excesiva aceleración de las tasas de maduración, y a un descenso de las disponibilidades de humedad en el suelo.

FIGURA 91

RESIDUALES DEL MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAS COSECHAS DE TRIGO POR MEDIO DEL SPI A LA ESCALA TEMPORAL DE 12 MESES.

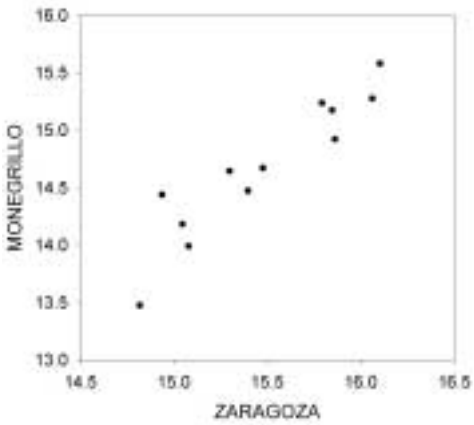


La mayor reducción de las cosechas con relación al descenso observado en el SPI es posible que pueda deberse al incremento térmico citado por la literatura. Por ello, a continuación se analiza la influencia que han podido tener los cambios térmicos en dicho proceso. Este análisis plantea un problema fundamental: el observatorio de Monegrillo únicamente dispone de datos térmicos a partir de 1990, y ningún observatorio de los alrededores de Monegrillo cuenta con una serie continua y homogénea de temperaturas tan larga como para poder ser considerada en el análisis. Para solventar este problema se ha construido una serie temporal continua a partir de los registros del observatorio de

Zaragoza, ubicado a 50 km de la explotación de Monegrillo. Para comprobar la idoneidad de dicha serie se realizó un análisis de correlación entre los datos disponibles en el observatorio de Monegrillo (desde 1990) y los de Zaragoza (temperaturas medias anuales). La correlación entre ambas series temporales anuales es de r = 0.93 (p < 0.01, Figura 92). Aunque las temperaturas medias registradas en el observatorio de Zaragoza son de 15.5 ºC entre 1990 y 2000, algo superiores a las de Monegrillo (14.7 ºC), el interés del análisis es determinar la influencia de cambios térmicos en la evolución experimentada por las producciones agrícolas en Monegrillo y, sobre todo, en la sobrestimación de las cosechas que se registra, utilizando exclusivamente el SPI, en los últimos años. Además, para el análisis de las precipitaciones es necesaria una abundante densidad de observatorios, debido a la elevada variabilidad que muestra esta variable en el espacio. En cambio, en el caso de las temperaturas la densidad espacial necesaria es inferior, ya que la variabilidad espacial de este elemento es inferior.

figura 92

RELACIÓN ENTRE LAS TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES EN MONEGRILLO Y EN ZARAGOZA (1990-2000)



Un problema importante que presentan las series térmicas es la homogeneidad temporal (Peterson *et al.,* 1998), en mayor medida que en las series de pluviométricas (Stepanek, 2003). En nuestro caso, el observatorio de Zaragoza (Aeropuerto), ha registrado datos térmicos desde enero de 1951. Entre 1941 y 1951 existen otros dos observatorios que registraron información en Zaragoza: (Facultad de Ciencias y Observatorio),

por lo que la construcción de una serie continua a partir de 1941 puede plantear algunos problemas de inhomogeneidad temporal debido a cambios de ubicación de los observatorios, o como consecuencia de influencias urbanas. En nuestro caso se han construido las series de temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales del observatorio de Zaragoza mediante la unión de las tres series disponibles. Se realizaron dos uniones: entre 1941 y 1949 los datos corresponden a la estación de la Facultad de Ciencias, entre 1949 y 1951 al Observatorio, y entre 1951 y 2000 al aeropuerto de Zaragoza. Por esta razón se ha aplicado un test de homogeneidad absoluto para identificar posibles inhomogeneidades coincidentes con estos cambios en la ubicación.

La aplicación del test absoluto de Alexandersson permite afirmar que no se producen inhomogeneidades absolutas en los datos térmicos (temp. máximas, mínimas y medias) coincidentes con los años de ruptura entre observatorios, de hecho, las inhomogeneidades registradas en algunos meses se producen a lo largo de la década de 1980, momento en el que se asiste al principal incremento térmico detectado a lo largo del siglo XX (Jones *et al.,* 2001).

Se han analizado las correlaciones temporales entre la serie térmica y las cosechas de trigo en la explotación de Monegrillo. Para tener en cuenta el efecto de la acumulación de valores térmicos en diferentes meses (tal como permiten las diferentes escalas temporales en el caso del SPI) se han realizado promedios a las escalas de 3, 6 y 12 meses. Al contrario de lo que sucede con las precipitaciones, cuya distribución está muy sesgada y cuyas series no se pueden asociar a una distribución normal, las series térmicas son predominantemente normales, por lo que dicho promedio resulta válido para los propósitos de este análisis.

En la tabla 33 se muestran las correlaciones entre las producciones de trigo en Monegrillo y los valores térmicos agregados (mediante promedios) a diferentes escalas temporales. En este caso se comprueba el predominio de correlaciones negativas, aspecto que indica que las altas temperaturas tienen efectos negativos sobre la productividad vegetal. Son los promedios que agrupan un menor número de meses los que indican las correlaciones más estrechas, sobre todo a la escala temporal de tres meses. Las correlaciones son superiores considerando las temperaturas medias mensuales.

tabla 33

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE TEMPERATURAS MEDIAS, MÁXIMAS Y MÍNIMAS AGREGADAS A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES (PROMEDIO DEL MES EN CURSO MÁS LOS N MESES ANTERIORES) Y LAS PRODUCCIONES ANUALES DE TRIGO EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO.

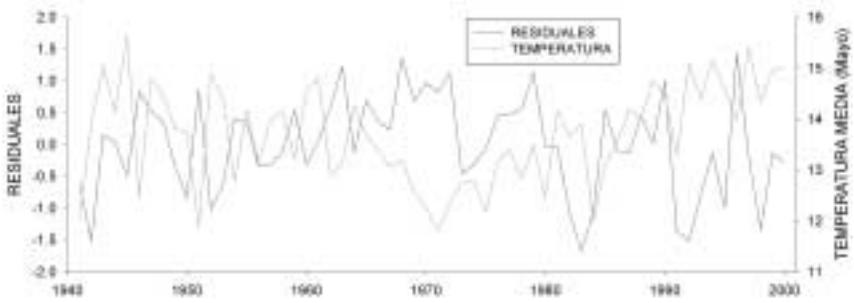
	Medias				Máximas				Mínimas			
	1	3	6	12	1	3	6	12	1	3	6	12
Septiembre	-0.03	-0.20	-0.14	-0.27*	0.04	-0.14	-0.06	-0.27*	-0.12	-0.25	-0.23	-0.32*
Octubre	0.09	-0.14	-0.14	-0.25	0.17	-0.05	-0.04	-0.25	-0.03	-0.23	-0.25	-0.31*
Noviembre	-0.13	-0.03	-0.18	-0.21	-0.15	0.05	-0.10	-0.21	-0.09	-0.12	-0.23	-0.28*
Diciembre	-0.03	-0.03	-0.15	-0.19	-0.14	-0.05	-0.13	-0.19	0.08	-0.02	-0.16	-0.26*
Enero	-0.04	-0.09	-0.15	-0.18	-0.12	-0.20	-0.16	-0.18	0.05	0.02	-0.12	-0.24
Febrero	-0.05	-0.06	-0.06	-0.19	-0.14	-0.21	-0.12	-0.19	0.08	0.10	0.00	-0.22
Marzo	-0.36**	-0.21	-0.16	-0.13	-0.39**	-0.34*	-0.26*	-0.13	-0.22	-0.03	-0.03	-0.12
Abril	-0.29*	-0.33*	-0.26*	-0.21	-0.33*	-0.41**	-0.41**	-0.21	-0.17	-0.14	-0.06	-0.17
Mayo	-0.43**	-0.54**	-0.37**	-0.26*	-0.37**	-0.52**	-0.48**	-0.26*	-0.48**	-0.44**	-0.16	-0.17
Junio	-0.25	-0.45**	-0.42**	-0.35*	-0.16	-0.42**	-0.47**	-0.35*	-0.36*	-0.46**	-0.29*	-0.22

En la figura 93 se muestra la evolución de la serie temporal de residuales resultantes de la aplicación del modelo a partir del SPI, y la serie de temperaturas medias en mayo a la escala de 3 meses (promedio de marzo, abril y mayo). En el caso de las temperaturas se comprueba un incremento a partir de la década de 1970, pasando de promedios en torno a 12 ºC hacia 1970 a un promedio de 15 ºC a finales de la década de 1990. Este incremento térmico coincide con una tendencia descendente en la serie de residuales. La correlación entre ambas series es negativa y estadísticamente significativa: ($r = -0.32$, $p < 0.01$), lo que indica que cuanto más altos son los valores térmicos la estimación de la producción de trigo, por medio del SPI, resulta superior a la realmente cosechada y, por lo tanto, los residuales son inferiores.

Este aspecto indica las graves consecuencias que puede tener el proceso de calentamiento señalado por los modelos climáticos (Houghton *et al.,* 2001), pues ello puede reducir significativamente las reservas de agua acumuladas en el suelo tras el invierno. Además, en el aspecto relacionado con el análisis y seguimiento de las sequías tal vez haya que considerar también el análisis de las series térmicas si se produce un calentamiento significativo, ya que aunque en el momento actual los índices que utilizan datos térmicos para su cómputo no aportan mayor información que los índices exclusivamente pluviométricos (Keyantash y Dracup, 2002; Guttman, 1998), si se incrementan las temperaturas éstas supondrán mayores pérdidas de humedad del suelo.

figura 93

EVOLUCIÓN DE LOS RESIDUALES DEL MODELO ENTRE PRODUCCIÓN Y SPI Y LA EVOLUCIÓN DE LA SERIE DE TEMPERATURAS MEDIAS DEL MES DE MAYO, A LA ESCALA DE 3 MESES (PROMEDIO DE MARZO, ABRIL Y MAYO).



Diferentes estudios han analizado las posibles consecuencias de un cambio térmico sobre la agricultura. Alexandrov (1997) analizó las consecuencias, a partir de modelos climáticos, sobre las producciones agrícolas en Bulgaria, mostrando para el año 2030 descensos en las producciones de trigo y maíz relacionados con el incremento de CO_2 atmosférico, el ascenso térmico y el descenso pluviométrico. Wassenaar *et al.* (1999) analizaron el posible impacto del incremento de CO_2 sobre las producciones de trigo de secano en el sur de Francia, estimando pérdidas de más de 1.5 T/ha, como consecuencia de los descensos pluviométricos asociados al aumento de gases de efecto invernadero. Similares resultados aportan Alexandrov y Hoogenboom (2000) en Bulgaria, donde como consecuencia del incremento de las sequías se producirían significativas reducciones en las producciones de trigo y maíz.

Schütz y Fangmeier (2001) señalaron que debido al incremento de CO_2 atmosférico es de esperar un incremento de la biomasa y de la producción vegetal. En sus análisis en Alemania señalan un incremento del 43 % y del 46 %, respectivamente, en ambos parámetros, como consecuencia del incremento de los niveles de CO_2. Sin embargo, a pesar del incremento del CO_2 atmosférico, la reducción de las disponibilidades hídricas puede tener más graves consecuencias (Manabe y Wetherald, 1986). Schütz y Fangmeier (2001) indican que el incremento de CO_2 atmosférico no compensa las pérdidas vegetales debidas a la falta de agua, y aunque se produzcan altos niveles de CO_2, que puedan favorecer el desarrollo de la vegetación, la falta de agua es un factor limitante superior.

A continuación se realizan los mismos análisis a partir de la serie de producciones de cebada. En la figura 94 se muestra la relación entre los valores finales de producción de cebada y el SPI del mes de mayo a la escala de 12 meses. Al igual que sucedía en el caso del trigo, la relación entre ambas variables resulta positiva y muy estrecha, correspondiendo a los valores más bajos de SPI las menores cosechas registradas entre 1941 y 2000.

En la figura 95 se muestra la evolución temporal de ambas variables. Los patrones de comportamiento temporal son similares a los indicados en el caso de las producciones de trigo, con una importante variabilidad interanual en las producciones, asociada a la variabilidad del SPI hasta 1960. A partir de esa fecha se asiste a un descenso de dicha productividad asociada a un aumento de las condiciones de sequía.

El desarrollo de un modelo de regresión que explique las producciones de cebada mediante el SPI se muestra en la tabla 34. En este caso se comprueba que el modelo explica el 59 % de la variabilidad interanual de la producción de cebada.

figura 94

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE SPI (MAYO) A LA ESCALA DE 12 MESES Y LOS VALORES DE PRODUCCIÓN DE CEBADA.

figura 95

EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE SEQUÍA (SPI A LA ESCALA DE 12 MESES EL MES DE MAYO) Y LAS PRODUCCIONES AGRÍCOLAS DE CEBADA EN MONEGRILLO. (1941-2000)

tabla 34

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE. VARIABLE DEPENDIENTE: PRODUCCIÓN ANUAL DE TRIGO. VARIABLE INDEPENDIENTE: SPI (12 MESES EN MAYO).

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
0.77	0.59	0.58	0.96

La expresión resultante es:

Raíz de la producción de cebada = 2.77 + 1.17SPI (mayo – 12 meses).

De esta forma se puede calcular el SPI correspondiente a una producción 0 (-2.36). En este caso, y al contrario de lo que sucedía con las producciones de trigo, no existe en los últimos años un incremento de los residuales obtenidos de la aplicación del modelo y su comparación con los datos reales (Figura 96).

En la tabla 35 se muestran los valores de correlación con las series de temperaturas medias, máximas y mínimas a diferentes escalas temporales. En este caso, la correlación superior se registra con la serie de temperaturas medias del mes de mayo a la escala temporal de 1 mes, pero las temperaturas no intervienen significativamente en la explicación de los residuales del modelo (Figura 97). La correlación entre ambas series no es significativa (r = -0.15, n.s.).

Para explicar este desigual comportamiento hay que tener en cuenta que los diferentes cultivos pueden tener distinta resistencia a las sequías (Doorenbos y Pruitt, 1976; Siddique *et al.,* 2001). Chmielewski y Köhn (1999) comprobaron diferentes resistencias a las sequías en distintos cultivos herbáceos de secano (cebada, centeno,...). Además, las diferencias en el uso del agua pueden ser importantes en función de la estación del año.

figura 96

RESIDUALES DEL MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAS COSECHAS DE CEBADA POR MEDIO DEL SPI A LA ESCALA TEMPORAL DE 12 MESES (MAYO).

tabla 35

CORRELACIÓN ENTRE LAS SERIES MENSUALES DE TEMPERATURAS MEDIAS, MÁXIMAS Y MÍNIMAS AGREGADAS A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES (PROMEDIO DEL MES EN CURSO MÁS LOS N MESES ANTERIORES) Y LAS PRODUCCIONES ANUALES DE CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO.

	Medias				Máximas				Mínimas			
	1	3	6	12	1	3	6	12	1	3	6	12
Septiembre	0.02	-0.14	-0.02	-0.11	0.02	-0.17	-0.02	-0.11	0.03	-0.09	-0.01	-0.10
octubre	-0.04	-0.14	-0.09	-0.11	-0.01	-0.14	-0.08	-0.11	-0.08	-0.13	-0.10	-0.08
Noviembre	-0.08	-0.05	-0.14	-0.09	-0.13	-0.05	-0.17	-0.09	-0.02	-0.03	-0.09	-0.07
Diciembre	0.01	-0.06	-0.12	-0.09	-0.12	-0.12	-0.19	-0.09	0.13	0.03	-0.04	-0.08
enero	-0.12	-0.10	-0.15	-0.08	-0.16	-0.20	-0.21	-0.08	-0.07	0.02	-0.06	-0.05
febrero	-0.04	-0.08	-0.09	-0.12	-0.14	-0.22	-0.18	-0.12	0.08	0.06	0.03	-0.07
marzo	-0.14	-0.15	-0.13	-0.07	-0.20	-0.26	-0.25	-0.07	-0.02	0.00	0.01	0.01
abril	-0.26	-0.22	-0.20	-0.13	-0.30*	-0.31*	-0.33*	-0.13	-0.14	-0.01	0.00	-0.04
mayo	-0.46**	-0.44**	-0.34*	-0.20	-0.45**	-0.46**	-0.45**	-0.20	-0.43**	-0.30*	-0.11	-0.05
junio	-0.18	-0.43**	-0.37*	-0.30*	-0.16	-0.45**	-0.44**	-0.30*	-0.20	-0.36*	-0.21	-0.12

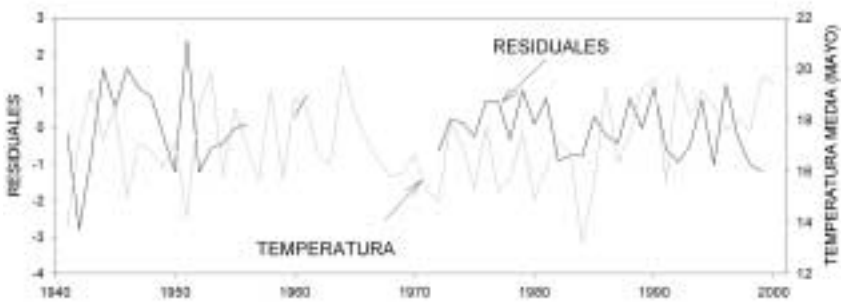
El trigo, por ejemplo, es más resistente a las condiciones de estrés hídrico en el periodo de maduración, lo que indicaría una adaptación biológica a los ambientes semiáridos, ya que éstos experimentan sequías frecuentes al final del periodo de crecimiento (Sheperd *et al.,* 2002). La cebada es muy resistente a los déficits de humedad en cualquier estación del año (González *et al.,* 1999), lo que podría explicar su menor dependencia respecto al trigo, con relación al incremento de los valores térmicos en el sector central del valle del Ebro.

Así pues, gracias al análisis de las largas series disponibles de producciones de trigo y cebada en el municipio de Monegrillo se ha comprobado que existe una importante influencia de las sequías en las producciones de cereal de secano, y que la tendencia descendente en la productividad, que se ha producido desde la década de 1960, responde claramente a un descenso de las condiciones de humedad, que quedaría expresado mediante el SPI. No obstante, el incremento térmico observado ha podido agravar las condiciones de sequía, limitando la disponibilidad de recursos hídricos en el suelo debido al aumento de las pérdidas por evapotranspiración.

Junto al análisis en Monegros, también se ha estudiado la influencia de las sequías sobre las producciones agrícolas en el municipio de Tarazona. Se han obtenido datos de producciones agrícolas totales (kg/hectárea) en cereal (trigo blando y cebada) procedentes de la cooperativa San Atilano. La información cubre el periodo entre 1993 y 2000, por lo que las posibilidades de análisis son inferiores que los que permitía la serie de la explotación en Monegrillo.

figura 97

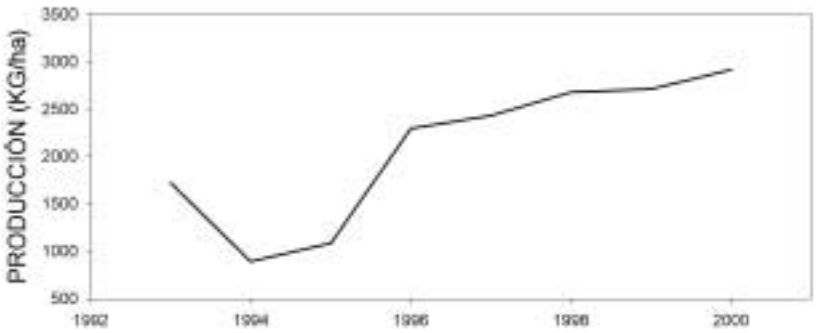
EVOLUCIÓN DE LOS RESIDUALES DEL MODELO ENTRE PRODUCCIÓN DE CEBADA Y SPI, Y LA EVOLUCIÓN DE LA SERIE DE TEMPERATURAS MEDIAS DEL MES DE MAYO.



La evolución de las producciones anuales en estos cultivos se muestra en la figura 98. Los años 1994 y 1995 registraron escasas producciones por hectárea (893 y 1086 kg/ha, respectivamente) con relación a los años 1996 a 2000, en los que las producciones agrícolas no descendieron de 2000 kg/ha.

figura 98

EVOLUCIÓN DE LAS PRODUCCIONES DE CEREAL (TRIGO BLANDO Y CEBADA) EN EL MUNICIPIO DE TARAZONA ENTRE 1993 Y 2000.



Dado que los datos no se refieren a una explotación de la que se conozca su ubicación, sino que responden a promedios de producción recogida en todo el término municipal, para comprobar la influencia de las sequías sobre la productividad vegetal se han utilizado los valores de SPI promedio resultantes de la interpolación espacial que corresponden a áreas agrícolas. En la tabla 36 se muestran los valores de correlación entre las series de SPI y las producciones de cereal. Se comprueba que las correlaciones significativas se registran a la escala de 3 meses considerando las series de abril y mayo, y a la escala de 6 meses en el mes de junio. En este caso las precipitaciones de primavera tienen mayor importancia que las de invierno, al contrario de lo que sucedía en el análisis de las producciones de cereal en la explotación de Monegrillo. Además, la influencia es superior considerando cortas escalas temporales que mediante la acumulación de las precipitaciones de todo el año. Hay que tener en cuenta que el periodo de tiempo considerado es diferente, por lo que la significación de estas comparaciones debe tomarse con ciertas reservas.

A pesar de la limitación que supone la escasa longitud de registros, se comprueba que, al igual que en Monegrillo, las sequías condicionan, de forma determinante, las producciones agrícolas. En la figura 99 se muestra la evolución de la serie de SPI (escala de 6 meses en junio). Se comprueba la baja producción de cereal entre 1993 y 1995, coincidiendo con unas severas condiciones de sequía, mientras que bajo condiciones de mayor humedad se asiste a un incremento significativo de la producción, entre 1996 y 2000.

tabla 36

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE PRODUCCIÓN ANUAL DE CEREAL EN TARAZONA Y LAS SERIES DE SPI A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES (1993 -2000). ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.01). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.05).

	SPI - 3	SPI - 6	SPI -12
Septiembre	0.28	0.31	0.54
Octubre	-0.61	-0.18	0.45
Noviembre	-0.49	-0.05	0.35
Diciembre	-0.31	0.04	0.34
Enero	0.43	-0.19	0.34
Febrero	0.27	-0.36	0.34
Marzo	0.36	0.15	0.39
Abril	0.72*	0.63	0.43
Mayo	0.71*	0.64	0.48
Junio	0.66	0.78*	0.55

figura 99

EVOLUCIÓN DE LAS PRODUCCIONES DE CEREAL (KG/HA) EN TARAZONA Y EL SPI A LA ESCALA DE 6 MESES EN JUNIO.

Para un análisis de carácter regional se han utilizado datos agregados comarcalmente. Los datos originales son las producciones aseguradas (en kg/ha) y las finales recogidas en las explotaciones. Los datos están agregados por comarcas agrarias, y son procesados por la Entidad Estatal de Seguros Agrarios (ENESA). El cociente entre la producción final y la producción estimada por las aseguradoras muestra la pérdida que puede asociarse a algún tipo de evento climático, y a las plagas o enfermedades que hayan podido afectar a estos cultivos.

Se han obtenido los datos correspondientes a 10 comarcas agrarias dentro del área de estudio. Algunas de ellas se encuentran insertas en su totalidad en el área de estudio. Otras, en cambio, muestran algunos municipios fuera de dicho ámbito, pero debido a la escasa superficie que representan, respecto al total, se ha decidido incluirlas en el análisis. En la figura 100 se muestra la distribución espacial de las comarcas agrarias utilizadas y su concordancia con los límites del área de estudio.

figura 100

COMARCAS AGRARIAS CON INFORMACIÓN SOBRE PRODUCCIONES AGRÍCOLAS. LÍMITES COMARCALES Y LÍMITE DEL ÁREA DE ESTUDIO.

En la figura 101 se muestra la evolución de las producciones agrarias (% cosechado respecto al estimado) en las diferentes comarcas agrarias entre 1993 y 1998. En todas las comarcas se muestran similares patrones temporales, con bajas producciones entre los años 1993 y 1995, mientras que se identifica un incremento muy significativo entre los años 1996 y 1998. No obstante, se comprueba que en las comarcas con pluviometría media superior (Hoya de Huesca o Somontano), las diferencias entre los años

con abundante pluviometría y los años secos son menos importantes. En estos sectores, los años secos muestran producciones superiores al 40 %, mientras que en las áreas más áridas del sector central del valle del Ebro la productividad es inferior al 20 %.

Se han establecido dos categorías, clasificando los años de cada una de las comarcas agrarias en función de su producción. Aquellos años en los que la producción superaba el 50 % del total fueron incluidos en un grupo, y los que estaban por debajo en otro. A partir de los valores de SPI del mes de junio (12 meses), que resume las condiciones de humedad en todo el año agrícola, se realizó un promedio de los valores del índice de sequía en los observatorios incluidos en cada comarca. De esta forma se dispuso de un valor promedio de las condiciones de humedad, a lo largo del año, en cada una de las comarcas.

Para determinar la posible influencia de las condiciones de humedad sobre las producciones agrarias se realizó un gráfico de cajas, incluyendo a todas las comarcas (Figura 102). En este caso se observa que los años en que se han recogido mayores producciones responden a valores más altos de SPI anual.

No obstante, al igual que se comprobaba con las series de imágenes de satélite, la influencia de las sequías es superior en las comarcas de mayor aridez. En la figura 103 se muestran los diagramas de dispersión entre los valores de producciones agrarias y los de SPI en el mes de junio, en la zona de mayor pluviometría del área de estudio (Hoya de Huesca), y en una zona de baja pluviometría (Comarca de Zaragoza). La correlación entre las series es, en ambos casos, significativa, pero en el caso de Zaragoza resulta más robusta ($r = 0.96$, $p < 0.01$), que en el de la Hoya de Huesca ($r = 0.81$, $p < 0.05$). Así pues, también con datos reales de producciones agrícolas se confirma que la influencia de las sequías puede llegar a ser contrastada dentro del área de estudio, siendo superior en los sectores más áridos del centro del valle, que verán más condicionadas sus producciones finales por la ocurrencia de sequías.

Con los análisis realizados se ha comprobado la utilidad de los índices de sequía para explicar la variabilidad interanual en las producciones agrícolas. En nuestro caso, por medio del SPI se puede explicar más de un 55 % de la variabilidad interanual de las producciones de cereal por medio del SPI, cifra similar a la que obtienen Chipanshi *et al.* (1999), o Quiring y Papakryakou (2003) en América del Norte.

figura 101

EVOLUCIÓN DE LAS PRODUCCIONES AGRÍCOLAS EN CADA UNA DE LAS COMARCAS AGRARIAS. 1: HOYA DE HUESCA, 2: SOMONTANO, 3: MONEGROS, 4: LA LITERA, 5: BAJO CINCA, 6: BAJO ARAGÓN, 7: BORJA, 8: LA ALMUNIA, 9: ZARAGOZA, 10: CASPE. FUENTE: ENTIDAD ESTATAL DE SEGUROS AGRARIOS (ENESA).

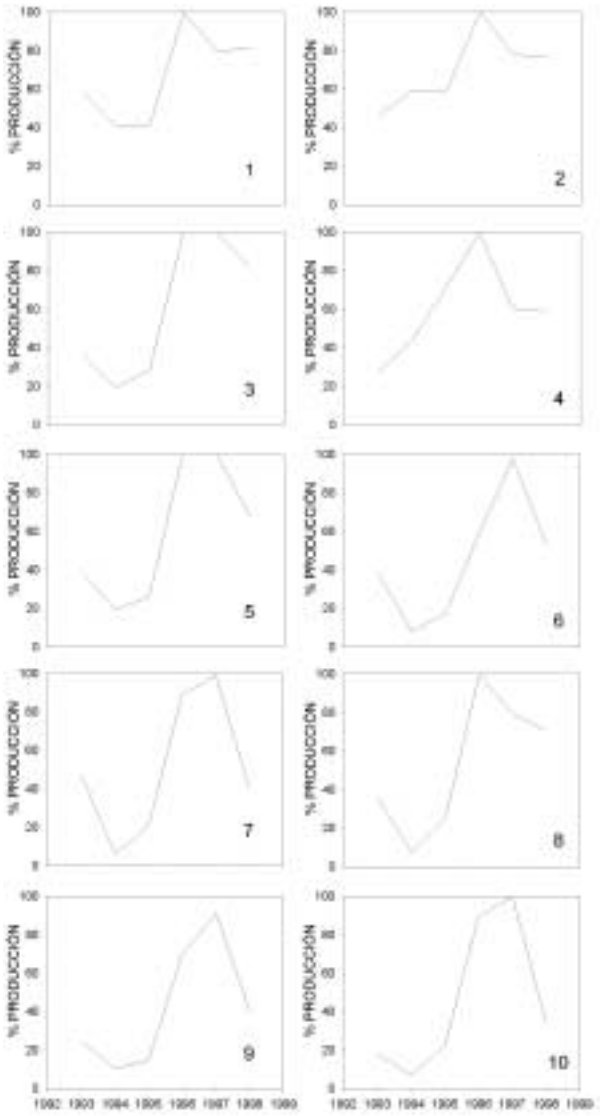


figura 102

DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE SPI EN LA TOTALIDAD DE LAS COMARCAS AGRARIAS Y EN LOS DISTINTOS AÑOS EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRARIA RECOGIDA EN EL AÑO CORRESPONDIENTE.

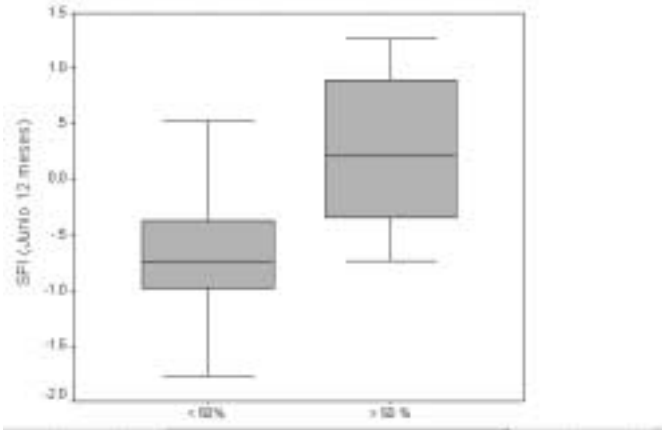
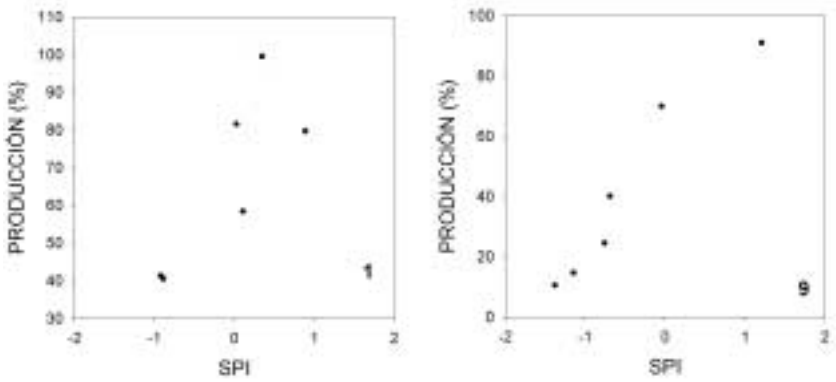


figura 103

RELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN Y EL SPI (12 MESES EN JUNIO) EN LA COMARCA DE LA HOYA DE HUESCA (1) Y EN LA COMARCA DE ZARAGOZA (9).



Se ha comprobado que la variabilidad interanual en las producciones es muy elevada, aunque existen importantes contrastes temporales. En las décadas de 1949 y 1950 se detecta una mayor variabilidad temporal en las series. Sin embargo, desde el año 1960

se asiste a un claro descenso de las producciones. El descenso difiere de las tendencias hacia el incremento que se han comprobado en las producciones cerealísticas a escala global, como consecuencia de las innovaciones tecnológicas (Hafner, 2003). Este aspecto es indicativo de que en el sector central del valle del Ebro las condiciones climáticas son demasiado áridas, y limitan que las producciones se vean beneficiadas por los avances técnicos si no se introducen regadíos. Este hecho se confirma por el importante control de las producciones finales de cereal por parte de los índices de sequía, y de la evolución, casi paralela, que han experimentado las producciones agrícolas y estos índices.

Además, también se ha comprobado que la relación entre los índices de sequía y las producciones finales es lineal, tal como señalaba Martí (1992b) en Monegros y como hemos indicado anteriormente por medio de imágenes de satélite en las regiones más áridas y de menor cubierta vegetal. No parece existir un límite superior a partir del que no se produce respuesta por parte de la vegetación, aspecto que confirma que en unas condiciones hídricas muy limitantes un importante porcentaje del agua disponible es aprovechado.

Los resultados indican que las producciones vegetales están más condicionadas por las precipitaciones que se registran durante determinadas estaciones, fundamentalmente durante las fases de crecimiento de la vegetación: en los meses de germinación (invierno) y en los de maduración (mayo), tal como indicaban Austin *et al.* (1998) o Martí (1992b) en Monegros.

Se ha comprobado que tanto en el caso del trigo, como de la cebada, las producciones están más condicionadas por las precipitaciones que se producen en los meses de diciembre, enero y mayo. En este último caso existe una elevada demanda de agua por parte de los cereales (Martínez-Cob *et al.,* 1998), mientras que la elevada correlación con las precipitaciones de los meses invernales estaría relacionada con la acumulación de agua que se produce durante estos meses (escasas tasas de ETP debido a las bajas temperaturas). Los resultados aportados por estos autores en el sector central del valle del Ebro o en otras regiones semiáridas (Austin *et al.,* 1998; van Oosteron *et al.,* 1993) indican que la recarga de agua durante el invierno es la que condiciona la acumulación de agua en el suelo para el posterior aprovechamiento por parte de la vegetación.

No obstante, mediante la acumulación temporal que permiten los índices de sequía, la relación entre las producciones y los valores de SPI aumenta, confirmando el importante peso de la acumulación de humedad durante el invierno. Sin embargo, las

cosechas finales están determinadas, en mayor medida, por las condiciones de humedad a lo largo de todo el año agrícola, resumidas a partir del SPI a la escala de 12 meses. Considerando el SPI a la escala de 24 meses las correlaciones se reducen significativamente. Ello podría estar condicionado por el hecho de que la principal causa de variaciones de agua, en los cultivos de secano, son solamente las precipitaciones recibidas en los tres últimos meses de barbecho, tal como han señalado Austin *et al.* (1998b).

Se ha comprobado que el descenso de las cosechas de trigo está acompañado de una disminución de los índices de sequía desde la década de 1960, con tendencias negativas y significativas en ambos parámetros. No obstante, el descenso es superior en el caso de las cosechas que en el del SPI. El 55 % de la varianza de las producciones de trigo es explicada por el SPI. Sin embargo, se ha identificado una tendencia hacia la subestimación de las cosechas, en los últimos años considerando los valores de SPI.

Por esta razón, hemos testado si el incremento térmico observado a escala global (Jones y Moberg, 2003; Jones *et al.,* 2001) puede estar en la raíz de este mayor descenso de las cosechas respecto al SPI, condicionado por un incremento de las pérdidas de humedad del suelo debido a más elevadas tasas de ETP. Los análisis han mostrado que la subestimación y el mayor descenso de las producciones, con relación al SPI, pueden estar causadas por un aumento térmico.

De continuar el incremento térmico, así como el descenso en las disponibilidades de humedad, las consecuencias pueden ser muy graves para el potencial productivo del área de estudio. Los trabajos que analizan las consecuencias agrícolas de un incremento de CO_2 y un calentamiento atmosférico señalan reducciones de las cosechas asociadas a estos cambios (Schütz y Fagmeier, 2001; Alexandrov y Hoogenboom, 2000). Wassenaar *et al.* (1999) así lo estimaron en la cuenca mediterránea, con pérdidas de hasta 1.5 T/ha como consecuencia del descenso pluviométrico.

En el caso de la cebada se ha comprobado también un descenso de la productividad paralelo al descenso en los valores de SPI, pero en este caso se indica que el ascenso térmico no tiene un efecto negativo sobre las producciones. Este desigual comportamiento puede estar condicionado por las diferentes respuestas de los cultivos a las sequías (Doorenbos y Pruitt, 1976). La cebada muestra producciones superiores al trigo, y ello puede estar motivado porque se encuentra más adaptada a las condiciones hídricas del semiárido español, siendo muy resistente a los déficits de humedad (González *et al.*, 1999). En el sector central del valle del Ebro, Martínez-Cob *et al.* (1998) indican que

las necesidades hídricas del trigo son superiores a las de la cebada, lo que hace a esta más resistente a las sequías.

Finalmente, la aproximación realizada considerando datos comarcales, también muestra que las producciones agrícolas están muy determinadas por las condiciones de sequía. No obstante, se ha comprobado que en las áreas más húmedas las reducciones de producción en los años secos son inferiores a las que se producen en los sectores más áridos. Ello indica que la respuesta a las sequías puede resultar muy contrastada en el área de estudio, incluso dentro de cultivos del mismo tipo.

desarrollo de un sistema de seguimiento y alerta temprana de sequías mediante información espacio-temporal integrada en un sistema de información geográfica

9. Desarrollo de un sistema de seguimiento y alerta temprana de las sequías mediante información espacio – temporal integrada en un sistema de información geográfica

Un componente crítico de la planificación del riesgo de sequía es la disponibilidad en tiempo real de una adecuada información climática que apoye a los gestores en el momento de tomar decisiones críticas. Esta información, si es aplicada de forma adecuada puede reducir el impacto de las sequías y de otros eventos climáticos.

En el año 2000 se celebró en Lisboa un seminario internacional sobre sistemas de seguimiento y gestión de las sequías en el que participaron profesionales de distintos países, mostrando sus experiencias en el problema de la gestión de las sequías. El resultado de dicho seminario fue una publicación (WMO, 2000) en el que han quedado patentes los esfuerzos y avances en este tema.

No obstante, en las aportaciones a dicho seminario queda patente una conclusión determinante: el largo camino que queda por andar y, sobre todo, las importantes diferencias existentes entre un país, en el que se han dedicado grandes esfuerzos y recursos en el desarrollo de adecuados planes de gestión de las sequías como es EE.UU., y el resto. El desarrollo de medidas de prevención y mitigación de las sequías, con diferente grado de acierto, ha sido uno de las constantes en EE.UU. desde la década de los años 30, con aproximaciones de carácter local, regional y estatal (Wilhite, 1983).

A lo largo de la las décadas de 1980 y 1990, las investigaciones y propuestas encabezadas por el Dr. Wilhite y su equipo de trabajo en EE.UU. se han traducido en un avance muy considerable. El esfuerzo financiero y mediático que se ha dedicado a este problema queda justificado porque las pérdidas sociales, económicas y ambientales asociadas a las sequías son muy importantes en EE.UU. Por ejemplo, la Agencia de Gestión de Federal de las Emergencias (FEMA) ha estimado que las pérdidas anuales atribuibles a las sequías en EE.UU. se estiman entre 6.000 y 8.000 millones de dólares (Wilhite y Svoboda, 2000).

Los esfuerzos han conducido a la creación de un organismo (El Centro Nacional de Mitigación de las Sequías, NDMC, 2003) encargado del estudio, seguimiento y alerta temprana de las sequías en todo el país, así como la puesta en marcha de sistemas de

seguimiento fácilmente consultables y operativos en tiempo real. De la importancia que se ha concedido a este tipo de sistemas es suficientemente indicativo que los mapas del *Drought Monitor* (herramienta desarrollada por el NDMC, Svoboda *et al.,* 2002) fueron presentados oficialmente en la Casa Blanca en 1999.

Pero los esfuerzos no sólo se han centrado en la creación de este centro y en el desarrollo de las técnicas y herramientas necesarias para la consecución de los objetivos, sino que en las diferentes administraciones se han realizado notables avances en la gestión del riesgo. En este sentido, en el año 2000, 30 estados tenían planes de seguimiento y control de las sequías (Wilhite y Svoboda, 2000).

Las estrategias de respuesta y preparación frente a las sequías son numerosas, y pueden aparecer a diferentes niveles, desde el meramente individual hasta niveles nacionales. Pueden ser de dos tipos (Parry y Carter, 1987):

1- Programas previos: que pretenden mitigar las futuras variaciones, con sistemas de alerta temprana, aumento de las reservas hídricas, reducción de la demanda y seguros agrarios.

2- Intervención post-impacto: son estrategias de respuesta ante las sequías u otros eventos climáticos extremos, como préstamos a bajo interés, subsidios, transporte de agua o restricciones. Estas medidas de gestión han sido criticadas por científicos y gobiernos, ya que se consideran inefectivas, ineficientes y fuera de tiempo (Wilhite, 1986 y 1993). Estos planes, además, desincentivan un uso sostenible de los recursos hídricos, ya que no promueven la dependencia respecto a los propios recursos (Bruwer, 1993; White *et al.,* 1993), y esta aproximación puede, de hecho, aumentar la vulnerabilidad frente a las sequías.

La mitigación del efecto de las sequías requiere el uso de todos los componentes del ciclo de gestión de los desastres, en vez de únicamente la porción de gestión de la crisis de este ciclo (Figura 104). En el pasado, cuando se ha producido una situación de sequía los gobiernos han actuado directamente mediante una cuantificación de los daños y la reconstrucción hasta llegar a una situación de pre-impacto. Menor atención se ha dado a la preparación, mitigación y a las acciones encaminadas a la predicción y a la alerta temprana (Motha, 2000).

No obstante, como la vulnerabilidad respecto a las sequías se ha incrementado globalmente, debido al crecimiento poblacional, y a la ocupación de áreas marginales de

mayor riesgo natural, se ha puesto gran atención en reducir el riesgo mediante la introducción de planes que mejoren las medidas de mitigación (Wilhite, 1997).

A pesar de ello, si exceptuamos los casos de EE.UU. (NDMC, 2003); Canadá (AGRC, 2003); Sudáfrica (Monnik, 2000) o Australia (Laughlin y Clark, 2000), en la mayor parte de las áreas en la que la recurrencia de las sequías es alta, como es el caso de la región mediterránea, cuando se produce un desastre, los gobiernos se centran en la identificación del impacto y en la reconstrucción para retornar a un estado de pre-desastre. Mucha menor atención se ha puesto en la preparación y predicción, y en la puesta en marcha de acciones de alerta temprana que podrían reducir impactos futuros y hacer que cuando se produzca un episodio extremo se precise de menor atención gubernamental. El ciclo de gestión de los desastres, y en concreto de las sequías, debería ser completado por medio de adecuados planes de mitigación del riesgo, siendo necesarios mayores esfuerzos en el desarrollo de las actividades pre-desastre (Wilhite y Svoboda, 2000).

figura 104

ESQUEMA DE GESTIÓN DE LOS RIESGOS. MODIFICADO DE WILHITE Y SVOBODA, (2000).

Para lograr una más adecuada gestión de las sequías, Wilhite (1991, 1997) publicó una metodología para la planificación de este tipo de riesgo que ha sido ampliamente seguida en EE.UU. Este método se planteó como genérico y adaptable a las necesida-

des de cualquier nivel de gestión y gobierno. La versión original de la metodología (Wilhite, 1991) se centraba en mejorar la respuesta gubernamental a las sequías por medio del desarrollo de una estructura institucional que permitiera el seguimiento del riesgo y la coordinación entre diferentes niveles administrativos. En la tabla 37 se resumen las diferentes fases del proceso de planificación. Los pasos 1 a 4 del plan se centran en aspectos administrativos y organizativos que garanticen la operatividad del sistema: como la creación de un complejo organizativo encargado de esta tarea que coordine acciones, implemente medidas de mitigación y programas de respuesta, y lleve a cabo recomendaciones políticas a las personas adecuadas dentro del cuerpo técnico o legislativo del estado.

tabla 37

FASES DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LAS SEQUÍAS.

Fases de desarrollo	Medidas
Fase 1	Designación de los encargados para la tarea de planificación
Fase 2	Desarrollo del propósito y los objetivos de un plan de preparación ante las sequías
Fase 3	Puesta en común y resolución de conflictos
Fase 4	Inventario de recursos e identificación de los grupos de riesgo
Fase 5	Desarrollo de la estructura organizativa y preparación del plan de sequías
Fase 6	Identificación de las necesidades de investigación
Fase 7	Integración de la comunidad científica y política
Fase 8	Difusión de los planes de preparación y seguimiento
Fase 9	Enseñanza y formación acerca de la sequía
Fase 10	Evaluación y revisión del plan de preparación

Los pasos 6 y 7 se centran en la necesidad de coordinar la investigación y facilitar la comunicación entre científicos y técnicos. Los pasos 8 y 9 se basan en la importancia de testar el plan antes de que la sequía se produzca, y el paso 10 incide en la necesidad de revisar la efectividad de los planes de sequía una vez que la sequía se ha producido.

El paso 5 describe la creación de la estructura organizadora del plan y se centra en el desarrollo de un sistema de alerta temprana de las sequías. El plan de prevención de las sequías debe tener tres componentes principales: seguimiento y alerta temprana, identificación del riesgo y sus impactos y finalmente: mitigación y respuesta.

Este punto será clave (Wilhite y Svoboda, 2000), ya que de su operatividad se podrán identificar las sequías con prontitud, pudiendo actuar ante las mismas de forma más eficaz. Una adecuada gestión del agua disponible debe basarse en información. Durante los periodos de sequía la disponibilidad de esta información se convierte en muy valiosa. Por ello, el seguimiento debe ser una parte integral de los sistemas de mitigación de las sequías climáticas que deben desarrollar las autoridades nacionales, regionales o locales. Lawrimore *et al.* (2002) inciden en que dentro del seguimiento de las sequías se deben integrar bases de datos a escalas espaciales y temporales adecuadas, y se deben generar productos y datos para su seguimiento.

Svoboda *et al.* (2002) señalan que la mejora en las técnicas de seguimiento de las sequías permite una mejor preparación y gestión, reduciendo la vulnerabilidad de la sociedad respecto a las sequías y, consecuentemente, los negativos impactos que se pudieran derivar. Respecto al interés que presentan este tipo de sistemas de seguimiento en EE.UU. baste señalar que la página *web* del "*Drought Monitor*" recibió 2 millones de visitantes en el año 2001, siendo de gran utilidad para agricultores y agencias federales (Svoboda *et al.,* 2002).

Sin embargo, pese al interés que se ha puesto en determinados países del mundo y a que las herramientas y métodos se encuentran disponibles, en España no se ha desarrollado, hasta el momento, un adecuado plan de prevención del riesgo de sequía, y los sistemas de seguimiento en tiempo real no existen. En España el problema resulta mucho más grave que en otros países desarrollados, ya que las características climáticas hacen que el agua sea un bien valioso y escaso cuya utilización debe racionalizarse (Martínez-Gil, 2003); en este sentido, Morales y Rico (1996) indicaron la falta de planificación en la adecuación de las actividades económicas a los recursos hídricos existentes. Frente a una adecuada gestión de los riesgos mediante la planificación, el desarrollo de sistemas de seguimiento, y de una efectiva actuación en los momentos en los que el desastre se ha producido; en España se asiste frecuentemente al olvido del riesgo. Tal como señala Cuadrat (2001): "es común que las sequías se olviden en cuanto se suceden uno o dos años con pluviometría normal,..., se cumple, pues, con demasiada frecuencia el famoso ciclo de Foehner: sequía – toma de conciencia – preocupación – pánico – lluvia – despreocupación." Morales *et al.* (2000) señalaron que las sequías de la década de 1990 evidenciaron la falta de planificación de los recursos por parte de la administración. Las diferentes administraciones han dedicado pocos esfuerzos a los programas previos, prefiriendo intervenciones en momentos de crisis. Es patente la falta de apropiados índices

climáticos y sistemas de alerta temprana, la insuficiencia de bases de datos para determinar los déficits hídricos y sus impactos, la falta de herramientas o métodos para una estimación temprana de los impactos en varios sectores, asistencia insuficiente que no alcanza a los grupos de población y a los sectores económicos más vulnerables, escasa financiación y recursos humanos, deficiencias institucionales que inhiben una respuesta eficaz, y carencias de coordinación entre diferentes niveles de administración. En vez de actuar mediante unos adecuados planes de mitigación, una vez desatada la sequía las autoridades resaltan el hecho de su imprevisibilidad para eludir las responsabilidades que conlleva una falta de planificación adecuada.

Pero hoy en día se formula un nuevo problema de graves implicaciones. El aumento del efecto invernadero plantea un importante debate con relación a la preparación de la sociedad para hacer frente a los posibles ajustes climáticos y a los riesgos que pueda conllevar. A pesar de que algunos sectores e intereses económicos hacen que se sostenga la tesis de que en el contexto tecnológico actual el sistema es lo suficientemente flexible como para hacer frente a los cambios, especialmente si ellos se producen de forma gradual, hay que señalar que la preparación de los organismos públicos y las instituciones privadas es escasa (Riebsame, 1988), lo que puede hacer que los riesgos derivados y sus consecuencias se incrementen notablemente.

Dada la frecuencia y severidad con que se producen las sequías en el sector central del valle del Ebro, y como consecuencia de los importantes impactos que producen en las áreas de condiciones más limitantes del valle, unos adecuados planes de seguimiento y prevención de las sequías serían muy útiles.

Hay que tener en cuenta que, aunque la disponibilidad de una buena información sobre el estado de las sequías y la predicción de las posibles condiciones futuras no garantiza adecuadas decisiones por parte de las autoridades competentes, es de esperar que se tomen decisiones más razonables que las que se realizan sin contar con información alguna (Wilhite *et al.,* 1986). Muchos tipos de información son necesarios para un adecuado seguimiento de las sequías, pero fundamentalmente será la información meteorológica la que permita describir los déficits hídricos y las áreas geográficas más afectadas. Para que dicha información sea útil es necesario que sea en tiempo real. Las personas deben ser avisadas tan pronto como se detecte la sequía para que esta información sea utilizada en la toma de decisiones.

Los planes de sequía que no tienen en cuenta la información en tiempo real corren el riesgo de detectar la sequía cuando esta haya alcanzado unas proporciones críticas y, entonces dicha actuación sea inútil (Wilhite *et al.,* 1986). Las estaciones automáticas y sensores terrestres y satelitales pueden proveer la base para la creación de sistemas de alerta temprana de las sequías ya que permiten la recogida de información en tiempo real. Finalmente, una herramienta esencial que garantice la utilidad de un sistema de seguimiento de las sequías es Internet, ya que permite que la información final pueda llegar a las áreas de interés de forma rápida, facilitando la operatividad del sistema.

Un sistema de alerta temprana debería incluir idealmente información meteorológica, agrícola, estimaciones de producción, tendencias en los precios agrícolas, disponibilidad de agua y vulnerabilidad socioeconómica (Monnik, 2000). Sin embargo, la obtención e integración de información tan diversa presenta una gran complejidad, y habitualmente este tipo de sistemas se basan en indicadores que tratan de aproximar las distintas implicaciones que puede tener una sequía. Se han desarrollado diferentes indicadores para la caracterización y el seguimiento de las sequías. Algunos de estos índices son utilizados en EE.UU. para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, como el índice de Palmer (NOAA, 2003b). Sin embargo, el comúnmente utilizado índice de Palmer está siendo reemplazado por el SPI como herramienta de seguimiento en muchos Estados. Un adecuado sistema de alerta temprana de la sequía debe aportar información sobre la extensión superficial de la sequía, su duración y severidad; aspectos que pueden ser cuantificados mediante el SPI.

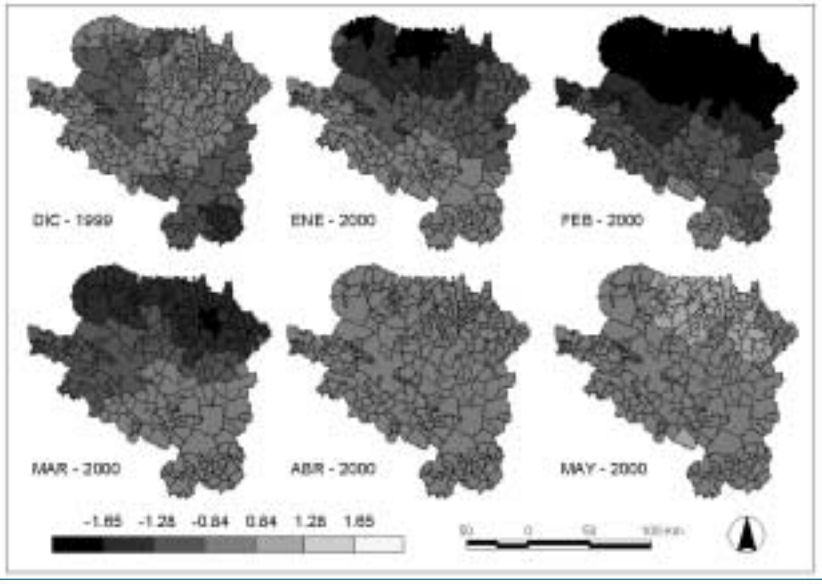
El *Standardized Precipitation Index* (SPI) fue desarrollado inicialmente para la caracterización de las sequías (McKee *et al.,* 1993; Edwards, 2001), pero se ha mostrado de gran utilidad para la cartografía y el estado de las sequías a diferentes escalas temporales. La información procedente de estaciones automáticas puede procesarse tras su recepción y calcularse el índice a una resolución mensual o semanal, de tal forma que pueden obtenerse cartografías a diferentes escalas temporales sobre las condiciones de sequía (Hayes *et al.,* 1999). El *National Drought Mitigation Center* (NDMC, 2003b) ha desarrollado un sistema de alerta temprana en EE.UU. mediante la utilización del SPI, de tal forma que cada mes se obtienen los valores del indicador.

Como ejemplo de la operatividad de un sistema de seguimiento de este tipo, en las figuras 105 y 106 se muestra la evolución de las condiciones de sequía el año 2000, en el sector central del valle del Ebro, mediante el SPI a las escalas temporales de 3 y 6

meses. Las diferentes cartografías se fundamentan en una base vectorial municipal. Los valores de cada municipio se obtienen mediante el valor promedio municipal de los pixeles correspondientes a las cartografías ráster construidas mediante interpolación (*splines*) de los valores de SPI en los observatorios disponibles. La información podría mostrarse también en valores continuos a la resolución deseada, para disponer de información en cada uno de los puntos del espacio. Sin embargo, para fines operativos en el seguimiento y gestión de las sequías resulta más interesante obtener un valor que identifique las condiciones de sequía en todo el municipio.

figura 105

EJEMPLO DEL SEGUIMIENTO DE LAS SEQUÍAS EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO MEDIANTE EL SPI A LA ESCALA TEMPORAL DE 3 MESES. SEQUÍA DEL INVIERNO-PRIMAVERA DE 2000.



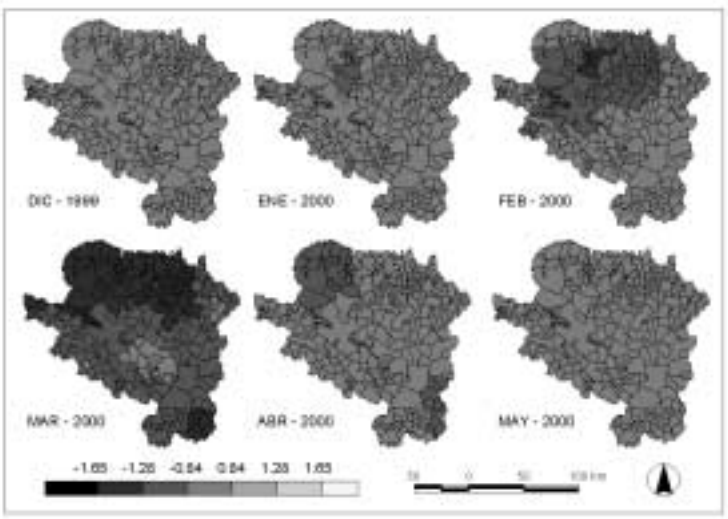
El desarrollo de una red de estaciones meteorológicas automáticas en el sector central del valle del Ebro, unido a las largas series históricas disponibles, las herramientas de control de calidad y homogeneización de la información, y la disponibilidad de sistemas de información geográfica para espacializar dicha información, permitirían desarrollar los indicadores operativamente y en tiempo real.

No obstante, la operatividad de estas herramientas no sería posible sin una transmisión rápida de la información a los sectores interesados. El envío a los organismos de gestión agrícola e hidrológica podría resultar automático, y la información llegarles, fácilmente, por medio de su publicación en una página *web*.

Los ejemplos presentados en el sector central del valle del Ebro corresponden a datos mensuales, pero también sería posible el desarrollo de cartografías semanales o quincenales, que permitieran un seguimiento temporal más continuo (las estaciones meteorológicas automáticas podrían aportar información incluso diaria) y rápidas decisiones en el caso de producirse una sequía.

gráfico 106

EJEMPLO DEL SEGUIMIENTO DE LAS SEQUÍAS EN EL SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL EBRO MEDIANTE EL SPI A LA ESCALA TEMPORAL DE 6 MESES. SEQUÍA DEL INVIERNO-PRIMAVERA DE 2000.



Resulta evidente que esta información puede ser de gran utilidad para conocer la situación espacial real de la sequía en el momento actual, así como para determinar su intensidad, y las escalas temporales a las que se está produciendo. También sería muy útil el desarrollo de un sistema de predicción probabilístico en el que a partir de los valores presentes y pasados de precipitación y SPI se pudiera determinar la probabilidad de que al mes siguiente, o dentro de *x* meses se registraran condiciones de sequía.

Un sistema de predicción de este tipo fue planteado en EE.UU. por Karl *et al.* (1987) a partir del índice de Palmer (PDSI). Estos autores determinaban la precipitación necesaria para que una sequía terminara en cada punto del espacio en un periodo de n meses, y su probabilidad asociada. La idea que subyace a este planteamiento resulta de gran interés aplicado, y su desarrollo a partir del SPI es sencillo, debido al propio carácter probabilístico del indicador. A cualquier escala temporal puede determinarse la precipitación necesaria, y su probabilidad, para que una sequía termine en un periodo de tiempo dado. Junto a la situación real en un momento concreto, esta información permitiría prever la situación más probable en un futuro, con la consiguiente aplicabilidad para la gestión agrícola e hidrológica.

El desarrollo de un sistema de predicción de este tipo resulta sencillo a partir de los valores de SPI. Aunque con fines operativos, más que los valores reales de SPI (cuya incertidumbre resulta muy alta), es más útil determinar la probabilidad de que se produzcan condiciones de sequía, condiciones normales o húmedas, de forma espacial, en los *x* meses posteriores.

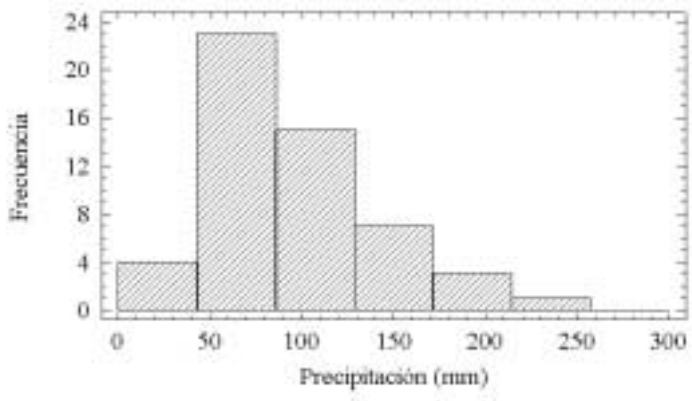
Por tener un importante interés aplicado se ha desarrollado, y sometido a examen, un sistema de seguimiento y control de las sequías de este tipo en el sector central del valle del Ebro, que está basado en el carácter probabilístico del SPI. Las clases seleccionadas para representar las sequías (Agnew, 2000) resultaban enunciadas de acuerdo con la probabilidad acumulada asociada, de tal forma que unas condiciones de sequía extrema corresponden a la precipitación correspondiente a un valor de SPI = -1.65, que es lo mismo que considerar una probabilidad acumulada del 5 %. En el caso de condiciones de sequía severa, el valor de SPI será igual a –1.28 y su probabilidad acumulada del 10 %. Para condiciones de sequía moderada el SPI corresponde a –0.84 y su probabilidad acumulada al 20 %. Hay que tener en cuenta que el SPI se calcula partiendo del ajuste a una distribución teórica, en nuestro caso Pearson III, de los datos de precipitación acumulada mensualmente, a diferentes escalas temporales (3, 6, 12, 24,..., meses). La probabilidad acumulada correspondiente a cada valor mensual y a las diferentes escalas temporales, se obtiene mediante el cálculo de los parámetros de la distribución. Conociendo el tipo de distribución que ajusta las series de precipitación, y los parámetros correspondientes, podremos estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación, que implica condiciones de sequía severa, moderada, condiciones normales, o incluso húmedas.

Considerando el SPI a una escala temporal de 3 meses podemos determinar la precipitación correspondiente a una situación de sequía extrema (SPI = -1.65, probabilidad acumulada = 5 %) a partir de la serie mensual, a dicha escala temporal, con la que se han estimado los parámetros de la distribución Pearson III. Esta precipitación puede estimarse el mes anterior, de tal forma que, por ejemplo, si nos encontramos en el mes de diciembre, podemos determinar la precipitación acumulada durante los meses de noviembre, diciembre y enero, que corresponde a una probabilidad menor o igual al 5%, a partir de la serie de precipitación acumulada de tres meses en enero.

Vamos a ilustrarlo con un ejemplo. En el observatorio de Borja, se dispone de una serie de precipitación acumulada durante los meses de noviembre, diciembre y enero, entre 1948 y 2000, de tal forma que se dispone de un registro por año en el que se recoge la precipitación total de estos tres meses. El promedio es de 96.7 mm, la desviación estándar es de 46.9 mm. El valor mínimo de la serie es de 15.8, y el máximo de 145.9. En la figura 107 se muestra el histograma de frecuencia de dicha serie, donde se puede comprobar el carácter no normal de la distribución y su mayor similitud a una distribución Pearson III, cuyos parámetros calculados son (Vicente-Serrano y Cuadrat, 2002): β = 2.87, α = 28.32 y γ = 15.30.

figura 107

HISTOGRAMA DE LA PRECIPITACIÓN ACUMULADA DURANTE 3 MESES DE ENERO EN EL OBSERVATORIO DE BORJA



A partir de esta serie se puede calcular la precipitación correspondiente a diferentes valores de probabilidad o SPI (5 %, 10 %, 20 %, 50 %,...). En la tabla 38 se mues-

tran los valores de precipitación correspondientes a diferentes probabilidades en el observatorio de Borja y el SPI, en la serie de enero, a la escala de 3 meses.

Dado que conocemos estos de valores de precipitación, si nos encontramos en el mes de diciembre y conocemos el valor de precipitación registrada durante los meses de noviembre y diciembre, podemos determinar la cantidad de precipitación que tiene que darse en el mes de enero para que se produzcan condiciones de sequía extrema, severa, moderada, condiciones normales, húmedas o muy húmedas, a la escala temporal de tres meses.

Para ilustrar el procedimiento seleccionamos el mes de diciembre de 1999, que ya se ha representado en las cartografías para ilustrar el sistema de seguimiento de la sequía. Durante los meses de noviembre y diciembre de ese año se registró, en el observatorio de Borja, una precipitación de 46.9 mm. La precipitación necesaria para que en enero se registre un SPI determinado, a la escala temporal de 3 meses, se obtendrá mediante la resta de esta precipitación conocida (noviembre y diciembre de 1999) a los valores de precipitación (correspondientes a diferentes probabilidades), considerando la serie de 3 meses en el mes de enero.

tabla 38

PRECIPITACIÓN ASOCIADA A DIFERENTES VALORES DE SPI EN EL OBSERVATORIO DE BORJA (MES DE ENERO A LA ESCALA TEMPORAL DE 3 MESES)

SPI	Probabilidad	Precipitación
-1.65	5%	36.4
-1.28	10%	44.3
-0.84	20%	56.3
0	50%	87.6
0.84	80%	131.7
1.28	90%	160.6
1.65	95%	187.8

Los resultados se muestran en la tabla 39. En el caso de registrarse valores negativos, éstos son convertidos a 0, y ello nos indica que aunque no se produzca precipitación alguna durante el mes de enero, estadísticamente no se podrán registrar condiciones de esa determinada intensidad de la sequía, ya que las precipitaciones necesarias para evitarla ya se habrán recibido durante los meses de noviembre y diciembre. La tabla nos indica que, por ejemplo, para que no se produzcan condiciones de sequía modera-

da deben registrarse, al menos, 9.4 mm. De producirse una precipitación inferior en enero, el valor de precipitación acumulada durante los tres meses estaría por debajo del 20 % de probabilidad y el SPI sería inferior a –0.84, por lo que se podría hablar de una situación de sequía moderada a la escala temporal de 3 meses. Por el contrario, para que se den condiciones muy húmedas a la escala de 3 meses serán necesarios 113.7 mm en enero, y para que éstas sean muy húmedas, 140.9 mm.

tabla 39

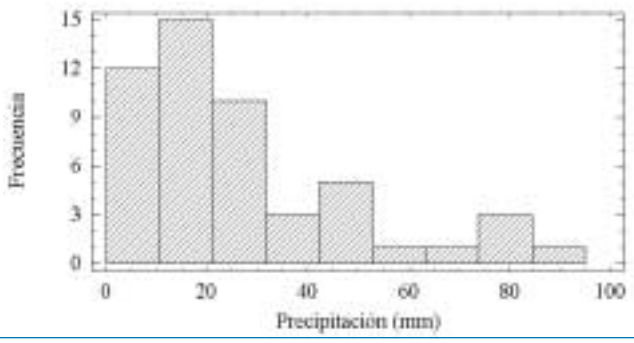
PRECIPITACIÓN MÍNIMA EN ENERO DE 2000 PARA QUE SE REGISTREN DIFERENTES VALORES DE SPI A LA ESCALA DE TRES MESES. OBSERVATORIO DE BORJA.

SPI	Probabilidad	Precipitación
-1.65	5%	0
-1.28	10%	0
-0.84	20%	9.4
0	50%	40.7
0.84	80%	84.8
1.28	90%	113.7
1.65	95%	140.9

Así pues, con esta información, y a partir de la serie de precipitación del mes de enero, podemos determinar la probabilidad acumulada de cada uno de estos valores. Las series a la escala de 1 mes también muestran distribuciones del tipo Pearson III. En la figura 108 se muestra el histograma de frecuencias de la serie de precipitación de enero, en el observatorio de Borja, donde se ilustra el ajuste con una distribución de este tipo. Los parámetros de dicha distribución son: $\beta = 1.46$, $\alpha = 18.66$, $\gamma = -1.62$.

figura 108

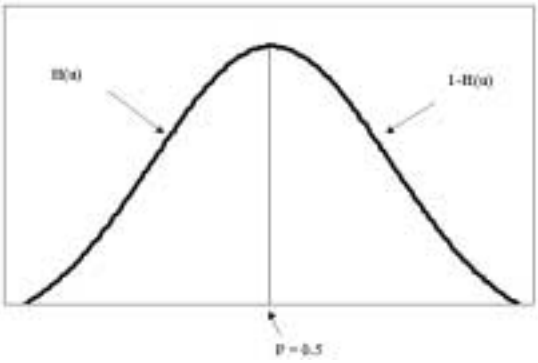
HISTOGRAMA DE LA SERIE DE PRECIPITACIÓN DE ENERO EN EL OBSERVATORIO DE BORJA



A partir de los parámetros de la distribución se puede conocer la probabilidad acumulada correspondiente a los valores de precipitación de la tabla 39, y de esta manera se puede determinar, en el mes de diciembre, la probabilidad de que en dicho observatorio se produzcan condiciones de sequía extrema, severa o moderada el mes de enero siguiente. La probabilidad acumulada de los valores de precipitación mostrados en la tabla 39 se calcula a partir de los parámetros α, β y γ indicados. Una vez obtenida la probabilidad acumulada, la probabilidad de ocurrencia de los valores por encima de 0.5 se obtienen mediante 1 – H(u), que es la probabilidad acumulada (Figura 109).

figura 109

PROCESO DE CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD ASOCIADA A UN DETERMINADO VALOR DE PRECIPITACIÓN PARA UNA SERIE PEARSON III CON PARÁMETROS CONOCIDOS.



De esta forma, se obtiene la probabilidad de que se produzcan situaciones de sequía moderada, severa, condiciones muy húmedas,..., con un mes de antelación. En la tabla 40 se muestran los resultados obtenidos para el observatorio de Borja en el mes de enero de 2000. Se comprueba que en diciembre de 2000 se registró una probabilidad del 81.22 % de que el SPI a la escala de tres meses en enero tuviera un valor negativo, es decir, condiciones de déficit de humedad, y una probabilidad del 27.84 % de que se dieran condiciones de sequía moderada. Frente a ello, la probabilidad de que se dieran condiciones húmedas solamente representó un 2.24 %.

La estimación podría desarrollarse también para febrero, aunque entonces la incertidumbre aumenta, ya que solamente se cuenta con la información del mes de diciembre. No obstante, la predicción con un mes de antelación puede ser de gran interés para la previsión y la alerta más temprana de las condiciones de sequía climática en

tabla 40

PROBABILIDAD DE QUE EN ENERO DE 2000 SE REGISTRARAN DETERMINADAS CONDICIONES DE HUMEDAD - SEQUEDAD A PARTIR DEL SPI A LA ESCALA DE 3 MESES. ESTIMACIÓN EN DICIEMBRE DE 1999.

Sequía extrema	0
Sequía severa	0
Sequía moderada	27.84
SPI negativo (<0)	81.22
Condiciones moderadamente húmedas	2.24
Muy húmedo	0.54
Extremadamente húmedo	0.15

el sector central del valle del Ebro. El sistema puede aplicarse también a otras escalas temporales, que acumulan más meses (6 o 12 meses) y posibilitar así una predicción para un mayor número de meses con mayor fiabilidad.

Para ilustrar el método hemos seleccionado una situación conocida (enero de 2000), a la escala de 3 meses, en la que se ha identificado una situación de sequía extrema, en el sector más noroccidental del área de estudio. El mismo análisis mostrado en Borja se ha realizado en el resto de los observatorios disponibles, de tal forma que a partir de los datos de precipitación de noviembre y diciembre de 1999 de las series históricas de precipitación acumulada a tres meses en enero, y la propia precipitación del mes de enero, se ha estimado la probabilidad de ocurrencia de una situación de sequía extrema, severa o moderada, así como la probabilidad de que en enero se registren valores de SPI negativos a la escala temporal de tres meses. Ello permite la elaboración de cartografías continuas (se han utilizado *splines* con tensión) y agregar los datos administrativamente (en este caso municipalmente) para una mejor operatividad del sistema.

En la figura 110 se muestra, por ejemplo, la precipitación necesaria en el mes de enero de 2000 para que se registren valores de SPI positivos. Como se puede comprobar, los valores resultan muy elevados en el noroeste del área de estudio. En la figura 105 se ha comprobado que en enero estos mismos espacios fueron los más afectados por la sequía climática a la escala de 3 meses.

En la figura 111 se muestran los resultados de la predicción, donde se indica la probabilidad de que se registren condiciones de sequía extrema, severa, moderada y valores negativos de SPI considerando las precipitaciones recibidas en noviembre y diciembre. Se comprueba que es el sector noroccidental el área de mayor probabilidad de que se registre una sequía extrema, con municipios con hasta el 30 % de probabili-

dad. Lo mismo sucede con la ocurrencia de sequías de carácter severo o moderado. A partir de estos registros se puede afirmar, con un 100 % de probabilidad, que se registrarán condiciones deficitarias (SPI negativo en todo este sector septentrional) durante el mes de enero. La similitud con lo realmente observado en enero resulta patente, ya que las áreas que presentaban una mayor probabilidad de ocurrencia de sequía en diciembre de 1999 correspondieron con los sectores más afectados por sequía en enero, con situaciones de sequía extrema en el sector noroccidental.

En enero, y conociendo las precipitaciones acumuladas durante ese mismo mes y el de diciembre de 1999 se puede estimar la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de sequía en el mes de febrero (Figura 112). De nuevo las probabilidades coinciden con lo que realmente se observó en dicho mes de febrero (ver figura 105) lo que reafirma la robustez estadística del método. La mitad septentrional del sector central del valle del Ebro se vio afectada por condiciones de sequía extrema o severa durante el mes de febrero. La probabilidad de ocurrencia de una situación de este tipo en enero resultaba elevada en este sector, por lo que la relación entre la situación estimada un mes antes y la realmente observada resultó muy alta.

figura 110

PRECIPITACIÓN (EN MM) NECESARIA EN ENERO DE 2000 PARA QUE SE REGISTREN VALORES DE SPI POSITIVOS. PREDICCIÓN EN DICIEMBRE DE 1999.

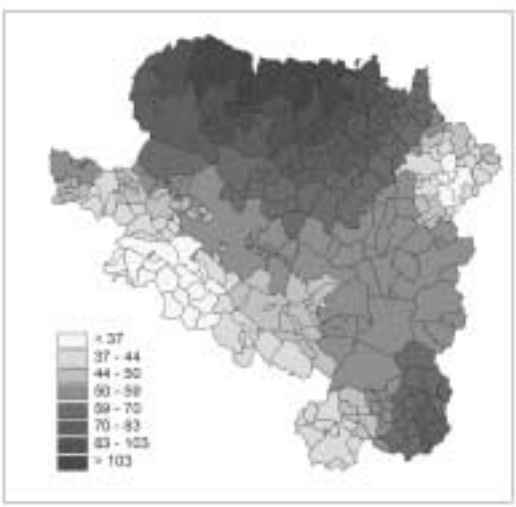


figura 111

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DIFERENTES NIVELES DE SEQUÍA A LA ESCALA TEMPORAL DE TRES MESES EN ENERO DE 2000, A PARTIR DE LOS REGISTROS DE PRECIPITACIÓN DE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE.

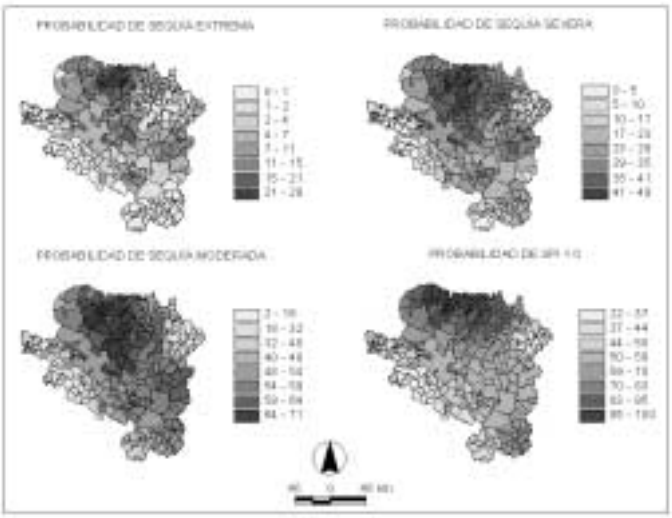
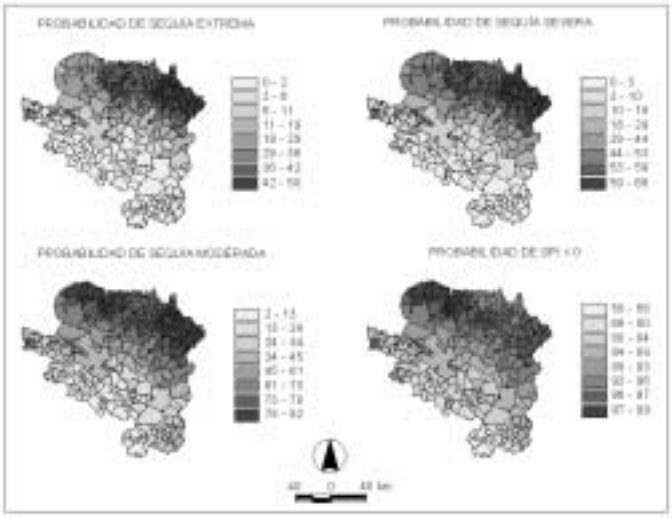


figura 112

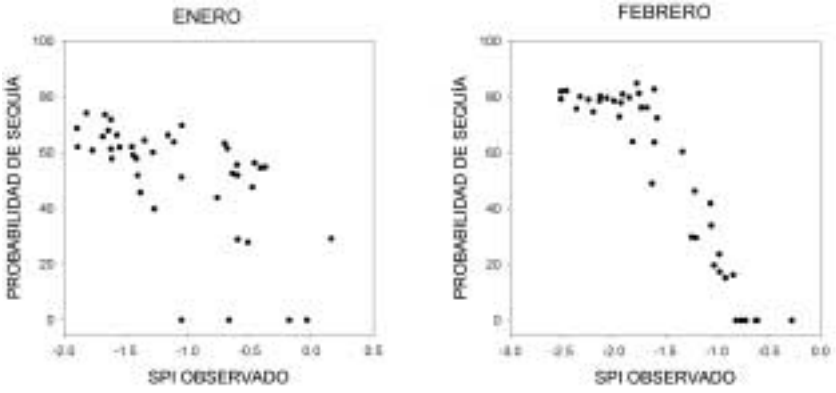
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DIFERENTES NIVELES DE SEQUÍA A LA ESCALA TEMPORAL DE TRES MESES EN FEBRERO DE 2000, A PARTIR DE LOS REGISTROS DE PRECIPITACIÓN DE DICIEMBRE Y ENERO.



En la figura 113 se muestra la validez de la predicción realizada, mediante la comparación de las probabilidades de ocurrencia de las sequías (sequía moderada), y los valores de SPI realmente observados en enero y febrero. La asociación es elevada en ambos casos, siendo la correlación en enero de $r = -0.62$ ($p < 0.01$), y en febrero de $r = -0.92$ ($p < 0.01$).

figura 113

RELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE SEQUÍA PREDICHOS UN MES ANTES Y LOS SPIS A LA ESCALA DE 3 MESES OBSERVADOS EN ENERO Y FEBRERO DE 2000



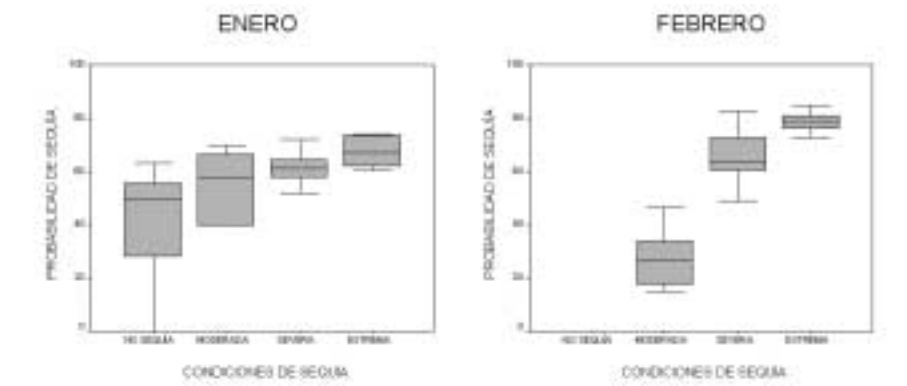
En la figura 114 se muestra la distribución de los valores de probabilidad de ocurrencia de sequía en los meses de enero y febrero de 2000, estimada el mes anterior, en función de la intensidad de sequía observada posteriormente en el observatorio correspondiente. Se puede comprobar una gran separación entre las diferentes clases, sobre todo en febrero de 2000, donde la probabilidad de ocurrencia de sequía fue baja en el caso de los observatorios que no experimentaron condiciones de sequía, o en los que ésta fue moderada. Frente a ello, la probabilidad de ocurrencia de sequía era muy elevada en los observatorios que posteriormente experimentaron condiciones de sequía severa o extrema.

Así pues, la predicción estadística de las condiciones de sequía, su intensidad y la distribución espacial de la misma es viable a una escala temporal de 3 meses dada la estrecha relación señalada en los dos casos analizados. Para una completa verificación sería necesario seleccionar otros episodios y considerar también otras estaciones del año,

pero como ejemplo de la posible operatividad de un sistema de este tipo el análisis muestra la gran potencialidad de las herramientas y técnicas utilizadas para el seguimiento y predicción de la sequía.

figura 114

DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE SEQUÍAS, EN EL MES ANTERIOR, MEDIANTE LA CATEGORIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE SEQUÍA REALMENTE OBSERVADA.



Así pues, se ha comprobado la gran potencialidad que puede revestir un sistema de seguimiento y predicción de las sequías que conjugue índices de sequía y sistemas de información geográfica. No obstante, y además del interés que presentan estos indicadores exclusivamente climáticos, el seguimiento de las sequías debería desarrollarse también mediante otro tipo de índices. Tal como señalan Wilhite y Svoboda (2000), un único indicador no es una adecuada medida para mostrar las complejas interrelaciones que se producen entre varios componentes del ciclo hidrológico y sus impactos. Además, de confirmarse una determinada situación de sequía (valores de intensidad, extensión superficial, duración) con diferentes indicadores, se garantizaría, en mayor medida, la identificación de una situación real, con posibles impactos socioeconómicos y naturales.

Ya que introducir otro tipo de indicadores climáticos no aportaría información adicional a la que permite el SPI (Keyantash y Dracup, 2002), creemos que sería de gran interés complementar un sistema de seguimiento con datos procedentes de imágenes de satélite, utilizando un indicador como el VCI que ya está siendo utilizado ampliamente para el seguimiento de las sequías (Kogan, 2000).

Las observaciones temporales basadas en imágenes AVHRR tienen un bajo coste, son de acceso libre y presentan una frecuencia temporal elevada. Se podría decir que este tipo de datos constituye una información básica y complementaria a la que se obtiene mediante mediciones in situ. Los sistemas de seguimiento temprano de las sequías, a partir de imágenes de satélite, podrían ser de gran utilidad, tanto para los agricultores como para los gestores. Kogan (2000b) ilustró como los recientes avances en tecnología espacial han mejorado nuestra capacidad para el desarrollo de sistemas de alerta temprana de las sequías y para un eficiente seguimiento de las características de las sequías. Este autor indica que con la ayuda de los satélites ambientales, la sequía puede ser detectada 4 o 6 semanas antes, y delimitar de forma más precisa las áreas afectadas. La utilidad del VCI para el seguimiento continuo de las sequías ha sido ilustrada anteriormente, y este indicador ha sido utilizado frecuentemente para la detección de las sequías, su seguimiento y la determinación de los impactos sobre el medio natural y la agricultura (Kogan, 1995 y 1997; Unganai y Kogan, 1998; Liu y Kogan, 1996).

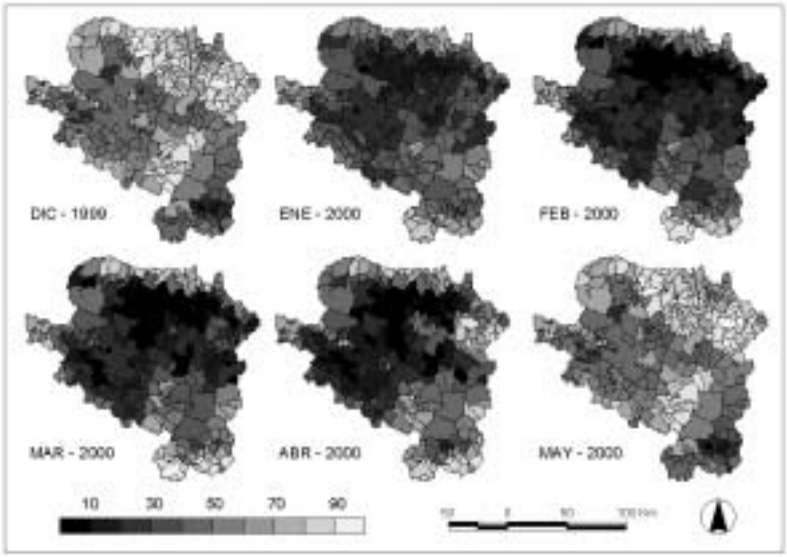
Debido a esta operatividad, diferentes organismos públicos están utilizándolo como herramienta de alerta temprana de las sequías. Este tipo de sistemas se ha puesto en marcha en Australia (McVicar y Jupp, 1998; Bryceson, 1993), en EE.UU. (NDMC, 2003) o, de forma incipiente, en el conjunto de la Península Ibérica (Flores *et al.,* 2001).

A partir de las imágenes mensuales de NDVI, disponibles del sector central del valle del Ebro, y mediante el cálculo del VCI, se ha analizado la evolución de la sequía que afectó a este espacio durante el invierno y la primavera de 2000, analizada anteriormente mediante el SPI a diferentes escalas temporales. En la figura 115 se muestran los valores de VCI mensuales entre diciembre de 1999 y mayo de 2000.

Los valores de VCI se encuentran agregados municipalmente (mediante el promedio de todos los pixeles) para facilitar la operatividad del sistema, al igual que se ha planteado para el SPI, obteniendo un valor único para cada municipio. Se comprueba que los patrones de distribución del VCI coinciden, durante los meses que más afectó la sequía (enero a abril), con la distribución espacial del SPI a la escala de 3 meses (Figura 105). Este índice reflejaba condiciones de sequía severa o extrema en las áreas más septentrionales del área de estudio entre enero y marzo. Así pues, se produce una estrecha relación entre las condiciones estimadas mediante índices de sequía y los daños registrados en la cubierta vegetal.

figura 115

VALORES DE VCI AGREGADOS MUNICIPALMENTE ENTRE DICIEMBRE DE 1999 Y MAYO DE 2000.



La información que aporta este indicador reforzaría la toma de decisiones con relación a la actuación frente a las sequías, obteniendo, junto al SPI, una visión muy precisa de la severidad con la que aparece la sequía y los daños que pueden esperarse de ella.

Toda esta información podría completarse, además, con datos sobre humedad del suelo medida en campo, caudales hidrológicos, reservas en embalses, etc., es decir, toda una red de información hídrica que permita hacer frente, con prontitud, a las posibles consecuencias negativas de las sequías. Todo ello puede integrarse en Sistemas de Información Geográfica más complejos, que permitieran una gestión más eficiente, accesibles en un entorno web vía Internet para los diferentes usuarios: públicos o privados.

Es necesario señalar que toda esta información resulta de utilidad en cuanto puede permitir actuar con prontitud, delimitando las áreas afectadas por sequía y su severidad. Si este tipo de sistemas puede utilizarse para la elaboración de predicciones espacio-temporales, la utilidad se incrementaría considerablemente. Poder conocer con

antelación como se van a ver afectados diferentes sectores económicos puede ayudar a la previsión de fondos o a una mejor gestión de las reservas hídricas disponibles.

Por esta razón, junto a la indudable utilidad del sistema de seguimiento de las sequías planteado en este capítulo, también se ha analizado su potencialidad para prever con antelación los daños sobre un sector clave en el valle del Ebro como es la agricultura de secano. De producirse resultados positivos, la operatividad del sistema y su posible utilización por otros sectores económicos resultaría más clara todavía.

Sirva como ejemplo señalar que los productos que genera el NDMC en EE.UU., tales como las cartografías de condiciones de sequía, son utilizados en los mercados mundiales por los agentes comerciales para anticipar los precios en los mercados de cereal. Con ello se pueden controlar los precios, anticipar o retrasar las ventas y maximizar los beneficios (Wilhite y Svoboda, 2000).

9.1. validación del sistema de seguimiento mediante la comparación con las producciones agrícolas de secano

En esta última sección se valida la posible utilidad predictiva de un sistema de seguimiento espacio-temporal de las sequías basado en índices climáticos (SPI) e índices de vegetación (VCI). La finalidad es determinar, con cierta antelación temporal, las cosechas de cereal de secano, lo que puede permitir la toma de medidas más tempranas por parte de las compañías de seguros agrarios, la administración, o incluso los propios agricultores.

Una prometedora aplicación de la teledetección es la predicción temprana de las cosechas por medio del análisis de la reflectividad de los cultivos (Curran, 1987). Los métodos desarrollados para ello llevan a cabo una relación causal entre la radiación reflejada y el área foliar durante el periodo vegetativo de la vegetación o la cosecha final.

Es frecuente la utilización de imágenes de satélite para la estimación de las cosechas agrícolas debido a la gran utilidad económica que presenta anticipar dichas producciones (Tucker *et al.,* 1981; Das *et al.,* 1993). En países del tercer mundo esta predicción tiene un interés muy superior, ya que si se pueden determinar malas cosechas con antelación se podrán tomar las medidas humanitarias de forma más temprana

(Henricksen y Durkin, 1986), limitando las hambrunas que afectan, con demasiada frecuencia, al continente africano.

La utilidad de la estimación de las producciones agrícolas mediante imágenes de satélite deriva de su disponibilidad antes de la cosecha o, al menos, antes de que las estadísticas agrícolas estén disponibles. En concreto, la utilidad de los datos procedentes de los satélites NOAA-AVHRR para el seguimiento de las cosechas y el estado de los cultivos ha sido puesta de manifiesto por numerosos autores, así como la integración de esta información en sistemas de información geográfica, para su combinación con información sobre usos del suelo, clima o vegetación (Wade *et al.,* 1994; Moulin *et al.,* 1998).

En general, el uso de las imágenes de satélite en este tipo de sistemas se basa en la elaboración de modelos predictivos obtenidos empíricamente, mediante la utilización de producciones agrícolas e imágenes de satélite, gracias a la estrecha relación existente entre ambas variables (Sellers, 1985; Tucker y Sellers, 1986; Choudhury, 1987). Por ejemplo, Maseli *et al*. (1992) mostraron una correlación de r = 0.53 entre la producción de grano en Senegal y el NDVI, existiendo una relación lineal entre ambas variables. Gruszczyuska *et al*. (1998) indicaron correlaciones más estrechas, superiores a 0.81, entre las producciones de cereales en Polonia y los valores de NDVI obtenidos con imágenes NOAA-AVHRR. Moleele *et al.* (2001) analizaron la producción forrajera mediante índices de vegetación en pastizales de Botsuana, obteniendo una buena correlación (r > 0.6) entre la productividad medida en el campo (biomasa) y diferentes ratios de bandas espectrales. Igualmente, Ashcroft *et al.* (1990) indicaron una correlación positiva entre el NDVI y la producción final de trigo en Inglaterra, mostrando que la correlación es máxima con los datos de reflectividad de primavera, antes de que el máximo de NDVI se alcance y comience el periodo de senescencia. Wylie *et al*. (1991) analizaron la producción pastoral en Níger entre 1986 y 1988 y la compararon con mediciones de NDVI. Estos autores obtuvieron valores de r2 superiores a 0.65 en la explicación de la biomasa final, obtenida mediante los valores integrados de NDVI. Lewis *et al.* (1998) comprobaron que en el este de África los valores de NDVI explican un 56% de las producciones anuales de maíz.

Gracias a estas estrechas relaciones entre los índices de vegetación y las producciones agrícolas finales se han desarrollado sistemas de predicción temprana de las cosechas mediante el uso del NDVI o VCI. El desarrollo de modelos de regresión, que relacionan el NDVI con las producciones agrícolas, ha sido planteado en diferentes regiones del mundo, pero sobre todo en África, Por ejemplo, en Burkina Faso, por parte Rasmussen (1992) y Groten (1993), en Níger por Maseli *et al.* (1992), o en Senegal por

Rasmussen, (1998) y Seguin *et al.* (1989). Rasmussen (1998b) analizó la relación existente entre el NDVI y las producciones agrícolas anuales en Senegal, señalando que el 88% de la varianza en la producción de mijo es explicada mediante un modelo de regresión múltiple utilizando valores de NDVI.

Kalubarme *et al.* (2003) utilizaron datos del satélite NOAA-11 para modelizar la producción de trigo en la India, comprobando que existe una significativa explicación de las producciones finales, con errores medios inferiores a 2 toneladas por hectárea. Estos autores indican una correlación de 0.86 entre los valores de NDVI integrado, a lo largo de todo el periodo de crecimiento y la producción final del cereal. Igualmente, buenos resultados han sido obtenidos por otros autores. Rasmussen (1997) obtuvo una explicación de la varianza del 72 % en la elaboración de un modelo predictivo de las cosechas de cereal en Senegal, considerando como variable predictora el NDVI del periodo de reproducción de los cultivos. Quarmby *et al.* (1993) investigaron la utilidad y el potencial del uso del NDVI para determinar la producción de los cultivos en el norte de Grecia, señalando un alto grado de exactitud en la estimación de las cosechas, con una relación lineal entre NDVI y producción en los cultivos de trigo, algodón, arroz y maíz.

El VCI ha sido utilizado también para la predicción de las cosechas en diferentes regiones. Por ejemplo, Unganai y Kogan (1998) usaron el VCI para la predicción de las producciones agrícolas en el sur de África mediante modelos de regresión lineal utilizando los valores de diferentes semanas del VCI, y obteniendo ajustes superiores a 0.7 en la mayor parte de los modelos. Señalan que la mayor relación se produce con los valores de VCI durante la fase reproductiva de los cereales. Seiler *et al.* (1998) también utilizaron el VCI para su comparación con las producciones agrícolas en Argentina. Estos autores señalaron que el 71 % de la variabilidad de cereal es explicada por las fluctuaciones del VCI durante determinados meses. Igualmente, Hayes y Decker (1996) correlacionaron los valores de VCI con las cosechas de cereal en los cinturones cerealísticos de EE.UU., y señalaron una relación muy estrecha entre ambas variables; con ello lograron una estimación muy similar, con el modelo creado, a las producciones registradas en cada uno de los años analizados.

Además de la utilización de imágenes de satélite e índices de vegetación para la predicción de las cosechas, los índices de sequía también han sido utilizados con este propósito. Yamoah *et al.* (2000) indicaron una buena correlación entre las producciones agrícolas y el SPI entre 5 y 7 meses en Nebrasca. Quiring y Papakryiakou (2003) compararon las producciones agrícolas en las llanuras cerealísticas canadienses con diferentes

índices de sequía, entre ellos el SPI, y comprobaron que la variabilidad espacial es elevada pero, en general, las correlaciones entre las producciones agrícolas y los índices de sequía son positivas y significativas. Anteriormente se ha mostrado la estrecha relación existente, en el sector central del valle del Ebro, entre las producciones de cereal en dos áreas y los índices de sequía climáticos, lo que a priori indica la posible utilidad de estos índices para la predicción temprana de las cosechas.

La utilización conjunta de índices de sequía climáticos e índices de vegetación en la predicción de las cosechas agrícolas, tal como se han planteado para un sistema de alerta temprana de las sequías, todavía no ha sido abordada por la literatura científica. Ésta, de forma general, utiliza ambos tipos de información de forma independiente.

No obstante, con todos los antecedentes existentes, podemos plantear la posibilidad de desarrollar un modelo de carácter predictivo a partir de la información procedente de las series de imágenes de satélite y de los índices de sequía, combinándola una serie de meses antes de la cosecha. La obtención de buenos resultados a partir de dichos modelos predictivos permitiría afirmar que un sistema de seguimiento de las sequías podría servir, también, como sistema predictivo de daños en los cultivos o en la vegetación natural, aumentando las ventajas de dicho sistema.

Hay que tener en cuenta que la base de datos histórica utilizada para el establecimiento de los modelos de regresión debe incluir años secos, normales y húmedos, para que los resultados sean válidos para un elevado rango de condiciones climáticas (Groten, 1993). En nuestro caso este requisito se cumple, con un suficiente número de años en los que se han registrado condiciones de sequía climática y años húmedos o muy húmedos.

Para determinar la utilidad del sistema de seguimiento de las sequías en la predicción de las producciones agrícolas se han utilizado los datos de producciones agrícolas disponibles en el área de Monegros y Tarazona. A partir de dichas producciones se han desarrollado dos modelos empíricos que permitan determinar, con algunos meses de antelación, como va a ser la cosecha de cereal, pudiendo aproximar las posibles consecuencias de las sequías, y permitiendo la toma de medidas con prontitud.

Anteriormente se ha comprobado que existe una importante relación entre los valores de los índices de sequía y los de las producciones finales de cereal. Así que, inicialmente, se analiza esta misma relación en el caso de los índices de vegetación, para

comprobar si las relaciones existentes son lo suficientemente robustas como para que estos índices puedan ser incluidos en un modelo predictivo. Para ello se utilizan los valores de VCI, que supone una medida relativa, y que es el índice que pueden cartografiarse y comparase, de forma espacial y temporal.

Dado que la longitud de las series de cosechas agrícolas en la explotación de Monegros es muy superior a la de los índices de vegetación, se ha tratado de ampliar la longitud de los registros utilizando los datos de la serie PAL procedente de la NASA, complementando la serie procesada por el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid. Se calcularon los valores de VCI mensuales en la serie PAL y se compararon los datos de las cosechas anuales en Monegrillo con las series mensuales de VCI del píxel (64 km^2) en el que se ubica dicha explotación. La aproximación puede resultar grosera, ya que las cosechas se comparan con la dinámica de un área muy amplia. Sin embargo, a pesar de este problema, consideramos incluir esta serie debido a que su longitud temporal es superior, además, posteriormente se ha ampliado el detalle espacial utilizando la serie de VCI obtenida de las imágenes a una resolución de 1 km^2.

En la tabla 41 se muestran las correlaciones existentes entre los valores de VCI de la serie PAL en diferentes meses y los de las cosechas de trigo y cebada (raíz cuadrada de dichos datos para garantizar su normalidad), en la explotación de Monegrillo entre 1981 y 2000. Tanto las producciones de cebada como de trigo muestran significativas correlaciones con el VCI en el mes de abril, lo que hace que este mes sea más propicio para su utilización en un sistema de alerta temprana. Además, ello presenta una gran utilidad operativa, ya que de utilizar este valor se podrían establecer predicciones dos meses antes de la cosecha. La mayor correlación registrada en junio, en el caso del cultivo de trigo, no sería útil con una finalidad operativa, ya que coincidiría con la recogida de la cosecha, y con la obtención de los datos reales de producción.

A pesar de que la resolución de las imágenes PAL resulta excesivamente grosera para aproximar la evolución de un espacio tan concreto, como es la explotación de la que se dispone de información, se ha comprobado una estrecha relación entre la evolución de las condiciones relativas de actividad vegetal, en el mes de abril, y las producciones finales de cereal de secano.

A continuación se analiza más en detalle esta relación a partir de la serie de VCI a la escala de 1 km^2. En la tabla 42 se muestran las correlaciones existentes entre el VCI, a esta resolución espacial, y las producciones de secano. En este caso, la representativi-

tabla 41

CORRELACIÓN ENTRE LAS PRODUCCIONES AGRÍCOLAS DE TRIGO Y CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO, Y LAS SERIES MENSUALES DE VCI (SERIE PAL, 1981-2000). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$). ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.01$).

	Cebada	Trigo
Enero	-0.02	0.06
Febrero	-0.11	0.03
Marzo	0.20	0.30
Abril	0.52*	0.53*
Mayo	0.35	0.40
Junio	0.40	0.61**

dad de la evolución productiva por parte del VCI es muy superior, ya que únicamente se han utilizado los dos píxeles de 1 km^2 en los que se encuentra inserta la explotación, llevando a cabo un promedio de los valores de NDVI de los mismos; a partir de estos valores promedio se ha calculado el VCI. En este caso se comprueba una más estrecha relación, al ser más representativos espacialmente los valores de VCI. De nuevo, el mes de abril resulta más idóneo para la elaboración de un modelo de predicción de las cosechas a partir de los valores de VCI.

tabla 42

CORRELACIÓN ENTRE LAS PRODUCCIONES AGRÍCOLAS DE TRIGO Y CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO Y LAS SERIES MENSUALES DE VCI A UNA RESOLUCIÓN DE 1 KM^2 (1987-2000). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$). ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p<0.01$).

	Cebada	Trigo
Enero	0.20	0.19
Febrero	0.26	0.22
Marzo	0.44	0.39
Abril	0.66*	0.57*
Mayo	0.58*	0.57*
Junio	0.58*	0.62*

En la figura 116 se muestra la evolución temporal de los valores de VCI en el mes de abril y las producciones de trigo y cebada. En este caso se comprueba como los valores de VCI resultaron altos en el año 1988, coincidiendo con producciones elevadas de cereal. Entre 1989 y 1995 las producciones se redujeron considerablemente, coincidiendo con bajas condiciones relativas de actividad vegetal en el mes de abril, siendo muy llamativo el importante descenso en ambas variables durante el año 1995, coincidente

entre el VCI y las producciones de ambos cultivos de cereal. Entre 1996 y 1997 se registró un incremento en las producciones de cereal, también coincidente con un ascenso del VCI en el mes de abril, sobre todo en el año 1997. En 1998 se produce un nuevo descenso en el VCI y en las producciones de ambos tipos de cereal, que se mantuvieron en niveles bajos durante los años 1999 y 2000, al igual que los valores de VCI.

Anteriormente se ha comprobado que existe una significativa relación entre los valores de los índices de sequía (SPI a diferentes escalas temporales) y las producciones agrícolas de trigo y cebada en la explotación de Monegrillo. Ya que conocemos la existencia de esta positiva relación entre las condiciones de actividad vegetal en el mes de abril y las producciones agrarias finales, podemos determinar un modelo de carácter empírico que permita la predicción de las cosechas con una serie de meses de antelación, con alguna garantía.

figura 116

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS SERIES DE PRODUCCIÓN DE TRIGO Y CEBADA EN LA EXPLOTACIÓN DE MONEGRILLO (RAÍZ CUADRADA DE LA PROPORCIÓN ENTRE COSECHADO Y RECOGIDO) Y EVOLUCIÓN INTERANUAL DEL VCI DEL MES DE ABRIL A UNA RESOLUCIÓN DE 1 KM^2.

Se han formulado dos modelos empíricos, uno en el caso de las producciones de cebada, y otro en el de las producciones de trigo; se han realizado dos análisis de regresión múltiple (*stepwise*, Hair *et al.,* 2000) a partir de la información disponible entre 1987 y 2000. Las variables dependientes han sido las producciones de trigo y cebada, mientras que las variables independientes han sido los valores de SPI en distintos meses (sep-

tiembre del año anterior a abril del año en curso) a las escalas temporales de 3, 6, 12 y 24 meses, y el VCI de los meses de enero a abril del año en curso.

En la tabla 43 se muestran las variables incluidas en el modelo predictivo de la producción de cebada, así como los valores de correlación con las producciones de cebada. En los tres casos las correlaciones son positivas y estadísticamente significativas.

tabla 43

VARIABLES INCLUIDAS EN EL MODELO PREDICTIVO DE LAS PRODUCCIONES DE CEBADA Y VALORES DE CORRELACIÓN CON LA SERIE ANUAL DE PRODUCCIONES DE CEBADA (1987 - 2000). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P < 0.05). ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA (P<0.01).

VARIABLES	CORRELACIÓN
VCI (Abril)	0.66*
SPI (3 meses – febrero)	0.81**
SPI (6 meses - abril)	0.80**

En las tablas 44 y 45 se muestran los resultados del análisis de regresión múltiple. El 70 % de la producción de cebada es explicada por estas 3 variables independientes.

tabla 44

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE. VARIABLE DEPENDIENTE: PRODUCCIÓN ANUAL DE CEBADA. VARIABLES INDEPENDIENTES: VCI (ABRIL), SPI (3 MESES - FEBRERO)

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0.83	0.70	0.58	0.77

tabla 45

TABLA ANOVA DEL MODELO PREDICTIVO DE LA PRODUCCIÓN DE CEBADA.

	Suma de cuadrados	df	Cuadrado media	F	Sig.
Regresión	10.81	3.00	3.60	6.13	0.02
Residual	4.70	8.00	0.59		
Total	15.52	11.00			

El modelo final enunciado es:

PRODUCCIÓN DE CEBADA = 2.21 + 0.001VCI + 0.515SPI3 + 0.46SPI6.

En la figura 117 se muestra la comparación de los datos estimados por el modelo con los observados de producción de cebada cada uno de los años. En esta figura se comprueba la estrecha relación existente entre ambas series, por lo que la utilización del modelo parece ser muy viable para la predicción final de la cosecha de cebada en dicha explotación, dos meses antes de su recogida.

figura 117

VALORES OBSERVADOS Y PREDICHOS POR EL MODELO DE PRODUCCIÓN DE CEBADA.

En el caso de las producciones de trigo, en la tabla 46 se muestran las variables incluidas en el modelo, las correlaciones entre cada una de ellas y la raíz de la producción de trigo. En las tablas 47 y 48 se muestran los resultados del modelo obtenido mediante análisis de regresión múltiple, donde el 78 % de la varianza de la producción de trigo es explicada por las tres variables independientes.

tabla 46

VARIABLES INCLUIDAS EN EL MODELO PREDICTIVO DE LAS PRODUCCIONES DE CEBADA Y VALORES DE CORRELACIÓN CON LA SERIE ANUAL DE PRODUCCIONES DE TRIGO (1987 - 2000). * CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p < 0.05$). ** CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA ($p<0.01$).

VARIABLES	CORRELACIÓN
VCI (Abril)	0.57*
SPI (3 meses - febrero)	0.77**
SPI (6 meses - abril)	0.87**

tabla 47

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE. VARIABLE DEPENDIENTE: PRODUCCIÓN ANUAL DE TRIGO.

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0.88	0.78	0.71	0.58

tabla 48

TABLA ANOVA DEL MODELO PREDICTIVO DE LA PRODUCCIÓN DE TRIGO

	Suma de cuadrados	df	Cuadrado media	F	Sig.
Regresión	10.74	3.00	3.58	10.81	0.00
Residual	2.98	9.00	0.33		
Total	13.72	12.00			

El modelo final enunciado es:

PRODUCCIÓN DE TRIGO = 2.21 - 0.001VCI + 0.20SPI3 + 0.93SPI6.

En la figura 118 se muestra la comparación de los datos estimados por el modelo y los observados de producción de trigo cada uno de los años. En este caso, la estimación es más similar que en el caso de las producciones de cebada, por lo que la aplicación del modelo para la predicción de cosechas parece ser más viable para el cultivo de trigo en la explotación ubicada en los Monegros.

Así pues, en el caso de la explotación ubicada en Monegrillo se comprueba la utilidad predictiva, con fines prácticos, de un sistema de seguimiento de las sequías a partir de índices de sequía climáticos y de indicadores procedentes de imágenes de satélite.

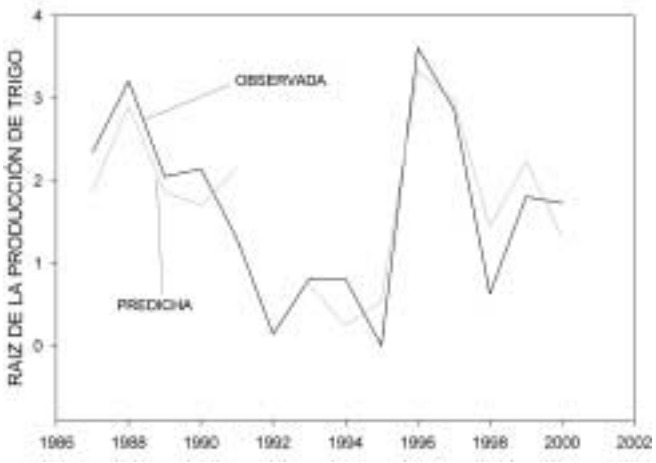
También se ha testado la utilidad del sistema de seguimiento mediante la utilización de las series de cosechas en el municipio de Tarazona. En la tabla 49 se muestran las correlaciones entre las producciones de cereal y los valores de VCI en diferentes meses del año. Para el cálculo de estos valores de VCI se ha realizado un promedio de todos los píxeles correspondientes a las áreas de agricultura de secano, en el municipio de Tarazona.

Como se puede comprobar, y tal como sucedía en Monegrillo, la correlación mayor se produce con los valores de VCI del mes de abril, que en este caso resulta estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

En la figura 119 se muestra la evolución de los valores de producción anual de cereal en el municipio de Tarazona y los valores de VCI promedio en el mes de abril. Se

figura 118

EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE TRIGO OBSERVADA Y LA PREDICHA POR EL MODELO



comprueba una estrecha relación entre la evolución temporal de ambas variables, excepto en el año 1996, en el que el valor de VCI fue bajo (< 20 %), mientras que la producción de cereales fue elevada. En el resto de los años de la serie la evolución de ambas curvas es más similar.

tabla 49

CORRELACIÓN ENTRE LOS VALORES DE VCI Y LOS DE PRODUCCIONES AGRÍCOLAS ANUALES EN TARAZONA.

enero	0.40
febrero	0.39
marzo	0.42
abril	0.72*
mayo	0.55
junio	0.62

figura 119

EVOLUCIÓN DE LAS PRODUCCIONES DE CEREAL Y DE LOS VALORES DE VCI EN EL MES DE ABRIL EN EL MUNICIPIO DE TARAZONA (1993-2000)

En este caso también se ha realizado un modelo explicativo que determine la posible predicción de las cosechas mediante la utilización de SPI y VCI. Mediante un análisis de regresión múltiple (*stepwise*) se ha generado un modelo con la inclusión de dos variables explicativas (VCI en abril y el SPI a la escala de 3 meses en ese mismo mes). En las tablas 50 y 51 se muestran los resultados del modelo. Con la inclusión de las dos variables se explica un 88.4 % de la varianza en las producciones de cereal.

tabla 50

RESULTADO DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN. PRODUCCIÓN DE CEREAL EN TARAZONA.

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0.94	0.88	0.84	310.18

tabla 51

TABLA ANOVA DEL MODELO PREDICTIVO DE LA PRODUCCIÓN DE CEREAL EN EL MUNICIPIO DE TARAZONA

	Suma de cuadrados	df	Cuadrado media	F	Sig.
Regresión	3672236.03	2.00	1836118.01	19.08	0.00
Residual	481068.52	5.00	96213.70		
Total	4153304.55	7.00			

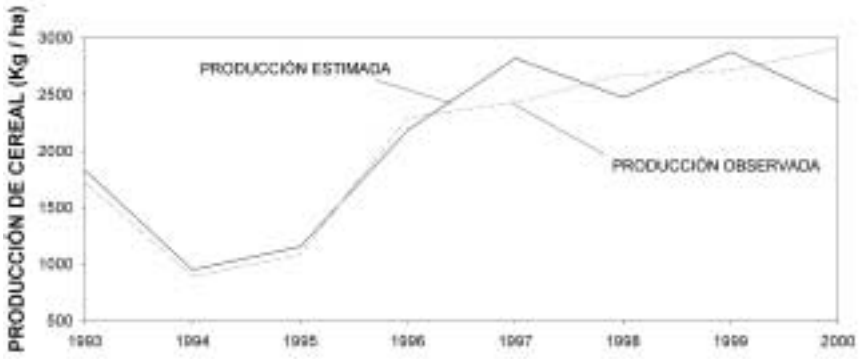
El modelo resultante es:

PRODUCCIÓN DE CEREAL = 1586.6 + 766SPI3 (ABRIL) + 15.2VCI (ABRIL).

En la figura 120 se muestra la evolución de las producciones observadas y aquellas predichas por el modelo. El ajuste entre ambas series es elevado, lo que confirma, de nuevo, la utilidad del sistema de seguimiento, esta vez en un área más amplia y considerando valores promedio de diferentes explotaciones.

figura 120

EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE CEREAL OBSERVADA Y LA PREDICHA POR EL MODELO EN EL MUNICIPIO DE TARAZONA.



Así pues, se ha mostrado la utilidad de un sistema de seguimiento de las sequías, que considere información espacio-temporal continua, basado en la aplicación de índices de sequía, y el uso de Sistemas de Información Geográfica e imágenes de satélite. La finalidad es eminentemente práctica, con el objeto de comprobar la utilidad del sistema, y que éste pudiera ser desarrollado, con pocos esfuerzos y utilidad operativa.

Inicialmente se ha mostrado, conceptualmente, la estructura de dicho sistema y, con posterioridad, se han utilizado las series de SPI disponibles para ilustrarlo, de forma práctica, mediante un caso de sequía real. Se ha mostrado la evolución de la sequía que afectó al sector central del valle del Ebro, de forma diferenciada espacialmente, durante el invierno del año 2000. Con el sistema se puede determinar la intensidad de la sequía a escala municipal de forma instantánea, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica, con las ventajas que ello tiene para conocer las condiciones de sequía y determinar las medidas de gestión oportunas.

Se ha señalado que la operatividad del sistema estaría garantizada mediante el uso de información en tiempo real, procedente de estaciones automáticas, que permi-

tiera su recepción, proceso automático, el cálculo de índices de resolución mensual o semanal a diferentes escalas temporales [que permitieran el seguimiento de sequías de carácter agrícola o ambiental (escala de 3 – 6 meses, Vicente-Serrano y Cuadrat, 2002) o sequías hidrológicas (12 meses, Szalai *et al.,* 2000)], y la creación de las cartografías finales.

Además del sistema de seguimiento, se ha desarrollado un método de predicción probabilístico para anticipar, tanto en el tiempo como en el espacio, las condiciones de sequía. Se ha seguido un criterio similar al planteado por Karl *et al.* (1987) pero, en nuestro caso se ha utilizado el SPI y no el índice de Palmer. Se ha explicado el procedimiento estadístico para el cálculo de las probabilidades de sequía, así como su integración en un Sistema de Información Geográfica.

También se ha ilustrado que como sistema de seguimiento podría completarse por medio de índices de vegetación, procedentes de imágenes de satélite, lo que permitiría determinar, además de la intensidad y extensión superficial de las sequías en tiempo real, los daños que éstas provocan sobre la cubierta vegetal. Esta información completaría una precisa visión sobre la severidad y extensión superficial de la sequía, y los daños que pueden esperarse de ella.

La utilidad del sistema de seguimiento se ha validado mediante producciones agrícolas. Con ello se ha comprobado, además, su gran potencial para la predicción temprana, con unos meses de antelación, de las cosechas con una gran precisión. La relación entre las producciones finales de cereal de secano y el VCI durante el periodo de crecimiento (abril) es muy estrecha. Esta conexión VCI-producción se basa en la relación causal existente entre la productividad vegetal y el índice de área foliar o la biomasa que presentan los vegetales en el momento de floración. Generalmente, el máximo de NDVI se observa cerca del periodo de floración de los vegetales, y es preferido en la realización de las regresiones NDVI (o VCI)-producción (Sharma *et al.,* 1993; Dadhwall y Sridhar, 1997).

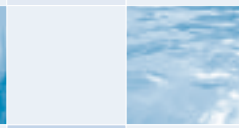
En general, coinciden los años con bajos valores de VCI y las bajas producciones de cereal. Mediante la integración de los valores de VCI y SPI en un modelo de regresión múltiple (*stepwise*), más del 70 % de la variabilidad de las producciones de cereal son explicadas por la información que integra el sistema de seguimiento de las sequías. Gracias a ello, los valores predichos por el modelo coinciden, de forma muy estrecha, con las producciones realmente observadas.

Este aspecto tiene dos implicaciones importantes. En primer lugar se corrobora la gran utilidad del sistema de seguimiento de la sequía, y su validez para comprobar los daños en las producciones agrícolas de secano. En segundo lugar, se comprueba la utilidad de esta información para anticipar, con hasta 3 meses de antelación, las producciones finales de cereal de forma muy precisa. Ello tiene la utilidad de poder determinar con antelación las consecuencias de las sequías, y que las entidades de seguros agrarios, o los propios agricultores puedan estar más preparados frente a ellas.

Así pues, para la gestión de las sequías es necesario disponer de una adecuada información accesible en tiempo real que ayude a la toma de decisiones. El sistema propuesto y testado en este capítulo se ha mostrado de gran utilidad en este sentido, lo que avala la utilidad del desarrollo de programas previos que permitan hacer frente, con mayor eficacia, a los impactos de las sequías. Ello mejorará, sin duda, los resultados que se obtienen de las frecuentes intervenciones post-impacto que, en general, son inefectivas y fuera de tiempo (Wilhite, 1986 y 1993). En España se han destinado pocos esfuerzos al desarrollo de programas previos de planificación de las sequías (Morales y Rico, 1996; Morales *et al.,* 2000), lo que incide en una vulnerabilidad socioeconómica superior, ya que se corre el riesgo de detectar la sequía cuando ésta ha alcanzado proporciones críticas. La gestión del riesgo de sequías se debe basar, pues, en una adecuada planificación (Wilhite, 1997) donde la creación de un sistema de alerta temprana de las sequías resulta fundamental para identificar las sequías con prontitud, pudiendo actuar de forma más eficaz en el espacio (Wilhite y Svoboda, 2000).

El tema, sin embargo, no quedaría cerrado. Toda esta información podría completarse con datos de humedad del suelo medidos en campo, caudales, reservas en embalses, etc., es decir, toda una red de información hídrica que permita hacer frente, de forma temprana, a las sequías.

discusión general



10. Discusión general

El análisis de las series de NDVI procedentes de las imágenes NOAA-AVHRR ha permitido comprobar que existe una gran diversidad espacial en la dinámica de la vegetación condicionada, principalmente, por la variedad existente de usos del suelo, los diferentes ambientes bioclimáticos y las diferencias fenológicas de las distintas cubiertas. Al igual sucede con la productividad vegetal, que también muestra una elevada diversidad espacial.

En general, y a pesar de las limitaciones de escala que introduce la baja resolución de las imágenes (1 km^2), se ha podido abordar un análisis del conjunto del área de estudio de forma continua en el tiempo, con una frecuencia de carácter mensual. Es indudable que la utilización de imágenes de mayor resolución espacial hubiera enriquecido los análisis, obteniendo mayor detalle, tanto en la dinámica de la vegetación como en la influencia de las sequías. Sin embargo, ello no hubiera permitido abordar el análisis en el conjunto del área de estudio, ni contar con una repetición de imágenes con tanta frecuencia temporal. Por ello, buena parte de los resultados supone una generalización de comportamientos que podrían ser más particulares en el espacio, pero que están determinados por la escala de trabajo seleccionada.

Los resultados indican que las zonas de vegetación más activa o más productiva a lo largo del año coinciden con los espacios que muestran mayor disponibilidad de agua, como los regadíos o los bosques que se ubican en las zonas más húmedas. Sin embargo, la fenología de los diferentes tipos de cubierta vegetal da lugar a que los patrones espaciales resulten contrastados a lo largo de las diferentes estaciones del año. A pesar de ello, las áreas más productivas coinciden con aquellos sectores en los que las condiciones climáticas son más adecuadas, con mayores precipitaciones, temperaturas medias inferiores y suelos adecuados, sobre todo en las áreas de bosques más septentrionales y en las zonas de regadíos, que reciben aportes de agua de forma artificial.

Las áreas de condiciones climáticas más limitantes y de mayor aridez muestran menor productividad vegetal. Se ha comprobado que las diferentes formaciones vegetales se adaptan a unas condiciones climáticas concretas, con la finalidad de hacer un uso eficaz del agua que reciben. De esta forma, la producción por precipitación recibida es similar en todas las áreas, lo que confirma en gran medida un control climático de la producción final en este ámbito semiárido. Diferentes autores señalan este control pluviométrico en la distribución espacial de la productividad vegetal en estos ámbitos semiári-

dos (Farrar *et al.,* 1994; Bonifacio *et al.,* 1993; Malo y Nicholson, 1990; Nicholson *et al.,* 1990), de tal modo que los diferentes tipos de cubierta vegetal se adaptarían a unas condiciones climáticas determinadas y, por tanto, las diferencias de productividad media estarían condicionadas, en última instancia, por esta distribución climática.

No obstante, también se ha comprobado que la variabilidad interanual de la cubierta vegetal puede ser muy significativa. Este aspecto ha sido comprobado en otras regiones semiáridas del Sahel (Nicholson *et al.,* 1998; Weiss y Milich, 1997) o de China (Fang *et al.,* 2001). A escala global se comprueba que son las áreas de clima semiárido las que muestran una mayor variabilidad interanual en los valores de NDVI, que estaría motivada por la mayor dependencia respecto a las condiciones climáticas. En el sector central del valle del Ebro, las áreas en las que el NDVI es más variable coinciden con aquellos espacios ocupados por cultivos de secano, matorrales y pastizales, aunque también hay que señalar que los patrones espaciales cambian a lo largo del año como consecuencia de las diferentes condiciones climáticas que se registran y de las diferencias fenológicas en la actividad vegetal de las diferentes cubiertas del suelo.

La menor variabilidad de los bosques puede estar condicionada por su ubicación en áreas de condiciones climáticas más húmedas, pues los sistemas radiculares son más desarrollados y pueden contribuir a una captación de agua a mayor profundidad, lo que supone que las condiciones climáticas concretas puedan ser un factor menos limitante. En cambio, la mayor variabilidad que se registra en las áreas de vegetación herbácea y arbustiva, ubicadas en los espacios más áridos, podrían estar mostrando las menores posibilidades que tienen estas especies de captar agua a mayor profundidad. Este hecho las podrá hacer más dependientes respecto a las condiciones pluviométricas que, además, son más escasas, variables e irregulares en el tiempo en los espacios que ocupan estas cubiertas. En general, se comprueba que la variabilidad del NDVI es más alta en aquellas áreas que reciben menores precipitaciones, independientemente de la diversidad de cubiertas del suelo. Los resultados coinciden con lo que señalaron Paruelo y Lauenroth (1998) en EE.UU., con una relación negativa no lineal entre la variabilidad interanual del NDVI y las precipitaciones anuales. Todo ello indica importantes contrastes en la variabilidad e incertidumbre que se produce en la actividad y producción vegetal de forma interanual, no sólo en función de los usos del suelo, sino fundamentalmente de las condiciones climáticas medias. Esta variabilidad implica diferencias significativas entre el NDVI de diferentes años, aunque éstas son más claras en las áreas de cultivos de seca-

no, matorrales y pastizales. Más estables interanualmente son las áreas de cultivos de regadío que reciben agua de forma artificial.

El clima es el principal causante de estas variaciones temporales en el NDVI, pues éstas están relacionadas, fundamentalmente, con las precipitaciones o con la disponibilidad de agua en el suelo (Malo y Nicholson, 1990; Davenport y Nicholson, 1993). Los ejemplos de esta estrecha relación entre precipitaciones y NDVI son diversos, y se han abordado, fundamentalmente, en ámbitos áridos o semiáridos (Justice e Hiernaux, 1986; Sannier y Taylor, 1998). En el área de estudio se han analizado los ciclos anuales de NDVI, comprobando que los mismos, así como las principales diferencias interanuales registradas están condicionados, sobre todo, por la evolución anual de la disponibilidad de agua del suelo, estimada mediante un balance hídrico climático, y por sus diferencias interanuales. Entre 1994 y 1996 se registran los valores más bajos de NDVI, así como las curvas de menor magnitud, que son coincidentes con déficits pronunciados en el balance hídrico del suelo.

No obstante, y aunque éstos sean los patrones generales, hay que señalar que las diferencias espaciales en dicha respuesta son muy significativas. Mientras los ciclos anuales de actividad vegetal están controlados en las áreas de regadíos y en los bosques de las zonas más húmedas por las curvas anuales de ETP, en las áreas de cultivos de secano, matorrales y pastizales, la relación es mayor con los balances hídricos del suelo. Esto se debe a que en los bosques más húmedos y en los regadíos, el agua no es un factor tan limitante como lo es en las zonas de vegetación herbácea y arbustiva de los sectores más áridos. Pero la relación entre las variables climáticas y el NDVI no se simplifica considerando exclusivamente los distintos usos del suelo, sino que las relaciones pueden ser muy diversas en función de las condiciones climáticas medias que se registren en cada espacio, independientemente de que se trate de un mismo tipo de cubierta vegetal.

Las áreas que corresponden a los espacios que reciben mayores precipitaciones muestran una baja variabilidad interanual de las curvas de NDVI, y un menor control de los ciclos vegetales por parte de las diferentes variables climáticas, ya que aunque se registren condiciones relativas de baja humedad en el suelo, los índices de vegetación se ven escasamente afectados. En cambio, en las áreas de clima más árido, la variabilidad del NDVI es más alta, y los ciclos de vegetación anuales están íntimamente relacionados con los valores de balance hídrico del suelo, de tal forma que los principales descensos de actividad vegetal coinciden con escasas disponibilidades de agua. Este hecho puede estar condicionado porque en las áreas más secas, tanto la vegetación natural como los

cultivos se encuentran cerca de sus límites de viabilidad bioclimática, y la reducción de las condiciones de humedad les afectará rápidamente.

El agua se constituye, pues, en el principal limitante de la actividad vegetal en la mayor parte del área de estudio. Ello queda de manifiesto al analizar la dinámica vegetal en los cultivos de regadío, que aunque se ubiquen en sectores de condiciones áridas, al recibir aportaciones de agua mediante riego reducen, de forma llamativa, su dependencia respecto a las condiciones climáticas. Esta mayor dependencia de las áreas más áridas respecto a las condiciones de humedad ha sido comprobada en diferentes ámbitos (Schultz y Halpert, 1995; Abrams *et al.,* 1998; Nicholson *et al.,* 1990), y puede explicarse por el desigual uso del agua que hacen las diferentes cubiertas del suelo, y por las diferencias existentes en los aportes pluviométricos totales dentro del espacio. En los sectores que reciben mayores precipitaciones, éstas podrían no ser aprovechadas por la vegetación en su totalidad, siendo ésta menos sensible a valores altos de precipitación. Ello podría sugerir la existencia de relaciones no lineales clima – vegetación, tal como han indicado otros autores (p. ej. Santos y Negrín, 1997). Sin embargo, el escaso número de registros temporales existentes, y las bajas precipitaciones que se reciben en el valle no nos han permitido profundizar en esta línea de investigación. Tal vez la inclusión de otras áreas, en este caso fuentes de recursos hídricos, como el Pirineo, donde se recogen abundante precipitaciones, permitiría identificar, de forma más evidente, relaciones no lineales clima–vegetación, con un umbral de precipitación a partir del que la vegetación no responde aunque se incrementen las precipitaciones.

Con relación a las diferencias interanuales de NDVI y al papel de las variables climáticas consideradas, se ha comprobado que en la explicación de estas diferencias son los valores de balance hídrico del suelo los que dan lugar, principalmente, a los contrastes interanuales del NDVI en las áreas forestales y en los espacios que reciben valores pluviométricos superiores. Frente a ello, son las precipitaciones que se recogen a lo largo del año las que condicionan, en mayor medida, la dinámica interanual de la vegetación en las áreas más áridas. Este hecho podría explicarse por las características fisiológicas de las diferentes cubiertas vegetales, con sistemas radiculares de diferente tamaño que permitirán la captación de agua a diferentes niveles.

En el caso del balance hídrico del suelo, se trata de un indicador con "memoria", en el que las condiciones climáticas de los dos años anteriores siguen teniendo peso en el valor actual del indicador. Ello supone que bajos valores de balance hídrico indican condiciones secas acumuladas durante el año en curso y el anterior. La vegetación her-

bácea y arbustiva muestra sistemas radiculares poco desarrollados que tendrán una menor capacidad para absorber agua a mayor profundidad, lo que podría explicar las mayores correlaciones que se han registrado con los valores de precipitación anual, pues esta vegetación tendrá una muy escasa capacidad para hacer frente a déficits hídricos de corta duración. Sin embargo, la vegetación arbórea podrá absorber agua a mayor profundidad, reduciendo su vulnerabilidad respecto a un año seco. Sería con una repetición de las condiciones de sequía durante varios años cuando esta capacidad para amortiguar los déficits hídricos se podría ver mermada, lo que explicaría la mayor respuesta a unos valores de balance hídrico del suelo, indicativos de las condiciones de humedad a escalas temporales más amplias. En este sentido, diferentes trabajos han mostrado que los bosques responden, en mayor medida, a las condiciones hídricas que se registran a lo largo de amplios periodos de tiempo (Orwing y Abrams, 1997; Jonsson *et al.,* 2002), y ello se argumenta porque en estas comunidades vegetales los déficits más duraderos pueden causar daños que precisen de largos periodos de tiempo para que la vegetación vuelva a recuperar su crecimiento normal.

Estos aspectos han sido señalados por Wang *et al.* (2003) mediante la utilización del NDVI. Estos autores han comprobado que en los cultivos el NDVI responde más rápidamente a las precipitaciones que en los bosques, que serán más sensibles a déficits más prolongados en el tiempo. En nuestro caso, además, la respuesta más alta respecto a los valores de precipitación anual se registran en los sectores del centro del valle, en aquellas zonas más áridas, donde se ha comprobado que las precipitaciones anuales son la variable que más influencia tiene sobre la producción final (Martí, 1992b; Alberto y Machín, 1978). Los resultados mostrados indican que las áreas con escasa vegetación son más vulnerables a los déficits que se registran en el año en curso, mientras que las áreas boscosas se verán más afectadas cuando los déficits se acumulen en el tiempo, y se asista a situaciones de sequía más prolongadas.

La respuesta de la vegetación a las precipitaciones no es tan alta como cabría esperar. Esto puede ser debido a que en las áreas mediterráneas un importante porcentaje de las precipitaciones se registra durante la estación fría, lo que implica que la relación precipitación–producción vegetal resulte más compleja que en áreas en las que las precipitaciones máximas se producen durante la estación cálida. Además, esta relación puede estar perturbada por la existencia de retardos en la respuesta vegetal, pues el suelo tiene capacidad de retención de agua y la vegetación puede hacer uso de ella tiem-

po después de que se produzcan las precipitaciones. Las plantas tienen la capacidad de limitar la transpiración y acceder a la humedad del suelo en capas más profundas.

Por estas razones, el descenso en las precipitaciones no tiene porqué estar acompañado de un descenso en el NDVI, y diferentes autores han comprobado que las correlaciones más elevadas entre NDVI y precipitación suelen producirse a partir de los valores pluviométricos acumulados durante varios meses (Wang *et al.,* 2003; Richard y Poccard, 1998; Justice *et al.,* 1986; Davenport y Nicholson, 1993).

Junto a todo ello hay que señalar que no se han tenido en cuenta una gran cantidad de factores que modificarán esta relación entre precipitaciones y NDVI. Entre ellos la escorrentía superficial que puede producirse con los eventos pluviométricos de mayor intensidad, la infiltración de agua en el suelo, o incluso otros factores relacionados con las prácticas antrópicas, que podrían explicar las diferencias espaciales en la relación NDVI–clima. Incluso habría que considerar la diversidad fisiológica que muestran las diferentes cubiertas vegetales, que puede dar lugar a una diferente eficacia en la utilización de agua por parte de la vegetación (Tucker y Choudhury, 1987).

Con relación a la influencia de las sequías sobre el NDVI, diferentes autores han señalado la superior respuesta del NDVI a las precipitaciones acumuladas durante periodos de dos o tres meses (Wang *et al.,* 2001; Malo y Nicholson, 1990; Farrar *et al.,* 1994; Liu y Kogan, 1996). Por ello, las posibilidades que introduce en los análisis el uso del SPI son notables, ya que permite considerar diferentes escalas temporales y, con ello, se puede determinar las áreas que están afectadas por déficits a corta escala, y los espacios que amortiguan estos déficits hídricos cortos pero que se ven afectados por déficits a una escala temporal superior.

Los análisis han mostrado que anualmente las correlaciones positivas más significativas, que afectan a un mayor porcentaje del área de estudio, se producen considerando los índices de sequía a las escalas temporales de 3, 12 y 24 meses. No obstante, es la evolución de baja frecuencia temporal, que indica las condiciones generales de humedad o sequedad durante amplios periodos de tiempo, la que mayor influencia tiene sobre el NDVI. Con ello, se comprueba la general adaptación de la vegetación a unas condiciones climáticas muy limitantes, amortiguando déficits hídricos de un año, mientras que las consecuencias negativas serán más evidentes cuando estos déficits se prolonguen durante más años. No obstante, hay que señalar que en amplias áreas de cultivos de secano se produce una significativa relación entre el NDVI y las series de SPI a la

escala de 12 meses, lo que implica que estos espacios tengan menor capacidad para amortiguar los déficits anuales y sean más vulnerables ante la ocurrencia de un año seco.

La respuesta a las escalas temporales largas (24 meses) se podría explicar, en las áreas de bosques, por la reducción de la capacidad fotosintética de la vegetación y por la ocurrencia de daños en diferentes mecanismos fisiológicos, que podrían dar lugar a un retardo de varios años para la recuperación de la actividad fisiológica, tal como indican Orwing y Abrams (1997) o Hanson y Weltzin (2000). A la escala de 12 meses la relación más alta se produce en las áreas de cultivos de secano, en las que tal como indican Austin *et al.* (1998), sus producciones anuales están condicionadas por las precipitaciones totales recibidas. Sin embargo, en este caso, y en el de las áreas de matorrales y pastizales también existe una significativa relación con el SPI computado a la escala de 24 meses. La explicación a este comportamiento podría buscarse en los efectos beneficiosos del barbecho en el caso de los cultivos, aunque esta práctica no implique un recarga de agua en el suelo de forma significativa (McAneney y Arrúe, 1993; Austin *et al.,* 1998b), y en el caso de las áreas de matorrales y pastizales, la mayor relación con estas escalas temporales largas de los índices de sequía podría explicarse por la posible merma de la producción de semillas tras un año seco, ya que se precisaría de un año húmedo para que la producción vuelva a ser adecuada, y permitir, al año siguiente, un mayor cubrimiento vegetal (Sheperd *et al.,* 2002; Leport *et al.,* 1999).

En general, en otros ámbitos semiáridos también se ha comprobado que la vegetación no se recupera totalmente de un episodio seco hasta un año después de que las condiciones de precipitación sean normales, tal como señalan en el Sahel Nicholson *et al.* (1998). A escala global, Potter y Brooks (1998) indicaron que en los ecosistemas marginales y de situaciones hídricas más limitantes, el NDVI puede verse afectado por las condiciones climáticas del año previo debido a la menor capacidad de la vegetación para recuperar su estado inicial tras producirse una perturbación. Este aspecto parece confirmarse en el sector central del valle del Ebro al analizar las diferencias espaciales que se registran en la respuesta de la vegetación a las sequías, en función de las características ecoclimáticas de cada espacio. Aquellas áreas más influidas por las sequías corresponden a las que albergan una vegetación de más escaso porte, donde la productividad es menor y que, además, muestran una elevada variabilidad interanual del NDVI, y reciben escasas precipitaciones medias. Ello implica que sean estas áreas de condiciones más áridas las que son más sensibles a las sequías, sobre todo los espacios de vegetación natural, donde la intervención humana es inferior.

También se ha comprobado que la influencia de las sequías no sólo varía en el espacio, sino que resulta muy contrastada en función de los meses del año y de las escalas temporales del SPI. No obstante, en general, es en los matorrales, pastizales y cultivos de secano del centro del valle donde la influencia de las sequías es superior. Sobre todo durante los meses en los que las condiciones térmicas son más favorables para una adecuada actividad vegetal, ya que es durante estas estaciones cuando la vegetación demanda más agua y es más vulnerable a las sequías.

Además de todo ello, la aplicación de un indicador que normaliza en el tiempo y el espacio el NDVI ha permitido comparaciones continuas entre la actividad vegetal y los índices de sequía a diferentes escalas temporales y en todos los puntos del espacio, independientemente de las diferencias existentes en los ciclos fenológicos de la vegetación. Las variaciones temporales de las condiciones relativas de la vegetación muestran que entre 1989 y 1996 se asistió a un considerable descenso en la actividad vegetal, que se prolongó hasta inicios de 1997. Este periodo presentó una gran variabilidad temporal en la actividad vegetal, con incrementos y descensos bruscos y poco duraderos. Excepto en 1994, 1995 y 1996, años en los que el conjunto del área de estudio quedó afectado de forma muy homogénea por las sequías, en el resto de los años se produjo una importante fragmentación espacial en las condiciones relativas de actividad vegetal.

En general, la respuesta es superior a la escala temporal de 24 meses, que es la que indica los episodios secos más generales que han afectado al área de estudio. Sin embargo, las escalas de mayor frecuencia temporal explican, en mayor medida, los cambios bruscos que tienen lugar en las series de actividad vegetal. Así pues, se podría decir que son las condiciones más generales de humedad las que explican, principalmente, los grandes patrones temporales de la actividad vegetal. Sin embargo, la heterogeneidad espacial es un aspecto a tener en cuenta, pues la influencia es mayor en las regiones más áridas del centro del valle, y la explicación de la varianza de la dinámica de la actividad vegetal no es absoluta mediante los índices de sequía considerados.

Habrá que tener en cuenta, también, la ocurrencia de episodios secos o húmedos de corta duración, o incluso de otros aspectos no considerados en los análisis, como olas de calor, frío o episodios de plagas, granizo, etc., que también influyen en la dinámica vegetal y que podrían explicar una parte de la varianza temporal de las series de vegetación. Pero, a pesar de ello, se ha comprobado que las sequías inciden notablemente sobre las condiciones de actividad vegetal, produciendo un notable descenso en los valo-

res de los índices de vegetación que, además, es espacialmente diferenciado en función de los usos y cubiertas del suelo.

Dada la existencia de esta relación, de producirse un incremento de las condiciones de sequía en la región mediterránea, como indican los modelos climáticos (Jones *et al.,* 1996), indudablemente se produciría un descenso de las producciones vegetales, así como una mayor variabilidad e incertidumbre en la viabilidad de los ecosistemas naturales y los cultivos. Sobre todo, en aquellos ecosistemas que se encuentran en sus límites de distribución ecológica, con unas condiciones climáticas áridas.

Con relación a las producciones agrícolas, diferentes trabajos han comprobado que en el sector central del valle del Ebro las producciones finales en los secanos están muy condicionadas por los totales pluviométricos recibidos (Martí, 1992; Alberto y Machín, 1978; Austin *et al.,* 1998). Este aspecto se ha confirmado con los análisis realizados, comprobando la utilidad de los índices de sequía para explicar la variabilidad interanual en las producciones agrícolas. En nuestro caso, por medio del SPI se puede explicar más de un 55 % de la variabilidad interanual de las producciones de cereal, cifra similar a la que obtienen Chipanski *et al.* (1999) o Quiring y Papakryakou (2003) en América del Norte.

Se ha comprobado que la variabilidad interanual en las producciones es muy elevada, aunque existen importantes contrastes temporales. Sin embargo, desde el año 1960 se asiste a un claro descenso de las producciones, que difiere de las tendencias hacia el incremento de las producciones cerealísticas a escala global como consecuencia de las innovaciones tecnológicas (Hafner, 2003). Este aspecto es indicativo de que en el sector central del valle del Ebro las condiciones climáticas son demasiado áridas como para permitir que las producciones se vean beneficiadas por los avances técnicos si no se introducen regadíos. Este hecho se confirma por el importante control de las producciones finales de cereal por parte de los índices de sequía, y de la evolución, casi paralela, que han experimentado las producciones agrícolas y estos índices en el sector central del valle del Ebro.

Los resultados indican que las producciones vegetales están más condicionadas por las precipitaciones que se registran durante determinadas estaciones, fundamentalmente durante las fases de crecimiento de la vegetación: en los meses de germinación (invierno) y en los de maduración (mayo). En este último caso existe una elevada demanda de agua por parte de los cereales (Martínez-Cob *et al.,* 1998), mientras que la eleva-

da correlación con las precipitaciones de los meses invernales estaría relacionada con la acumulación de agua que se produce durante estos meses (escasas tasas de ETP debido a las bajas temperaturas). Los resultados aportados por estos autores en el sector central del valle del Ebro o en otras regiones semiáridas (Austin *et al.,* 1998; van Oosteron *et al.,* 1993) indican que la recarga durante el invierno es la que condiciona la acumulación de agua en el suelo para el posterior aprovechamiento por parte de la vegetación.

No obstante, mediante la acumulación temporal que permiten los índices de sequía, la relación entre las producciones y los valores de SPI aumenta, confirmando el importante peso de la acumulación de humedad durante el invierno. Sin embargo, las cosechas finales están determinadas, en mayor medida, por las condiciones de humedad a lo largo de todo el año agrícola, resumidas a partir del SPI a la escala de 12 meses. Considerando el SPI a la escala de 24 meses las correlaciones se reducen significativamente. Ello podría estar condicionado por el hecho de que la principal causa de variaciones de agua, en los cultivos de secano, son las precipitaciones recibidas en los tres últimos meses de barbecho, tal como han señalado Austin *et al.* (1998b). Sin embargo, las correlaciones también son elevadas y estadísticamente significativas a esta escala temporal ($p < 0.01$), por lo que, tal como señalan McAneney y Arrúe (1993), el sistema de año y vez (cuyas condiciones de humedad acumulada recogería el SPI a la escala de 24 meses) podría actuar como colchón hídrico, reduciendo la dependencia de las producciones respecto a las precipitaciones, y disminuyendo el riesgo de plagas en los cultivos.

Se ha comprobado que el descenso de las cosechas de trigo está acompañado de una disminución de los índices de sequía desde la década de 1960, con tendencias negativas y significativas en ambos parámetros. No obstante, el descenso es superior en el caso de las cosechas que en el del SPI. El 55 % de la varianza de las producciones de trigo es explicada por el SPI. Sin embargo, se ha identificado una tendencia hacia la subestimación de las cosechas, en los últimos años, considerando los valores de SPI.

Por esta razón, se ha testado si el incremento térmico observado a escala global (Jones y Moberg, 2003; Jones *et al.,* 2001) puede estar en la raíz de este mayor descenso de las cosechas respecto al SPI, condicionado por un incremento de las pérdidas de humedad del suelo debido a mayores tasas de ETP. Los análisis han mostrado que la subestimación y el mayor descenso de las producciones, con relación al SPI, pueden estar causadas por un aumento térmico ya que el descenso de las producciones respecto al SPI coincide con un notable aumento de las temperaturas, y existe una relación significativa

entre los residuales no explicados por el SPI y la evolución experimentada por las temperaturas en el sector central del valle del Ebro.

De continuar el incremento térmico, así como el descenso en las disponibilidades de humedad, las consecuencias pueden ser muy graves para el potencial productivo del área de estudio. Los trabajos que analizan las consecuencias agrícolas de un incremento de CO_2 y un calentamiento atmosférico señalan reducciones de las cosechas asociadas a estos cambios (Schütz y Fagmeier, 2001; Alexandrov y Hoogenboom, 2000). Wassenaar *et al.* (1999) así lo estimaron en la cuenca mediterránea, con pérdidas de hasta 1.5 T/ha como consecuencia del descenso pluviométrico.

En el caso de la cebada se ha comprobado también un descenso de la productividad paralelo al descenso en los valores de SPI, pero en este caso se indica que el ascenso térmico no tiene un efecto negativo sobre las producciones. Este desigual comportamiento puede estar condicionado por las diferentes respuestas de los cultivos a las sequías (Doorenbos y Pruitt, 1976). La cebada muestra producciones superiores al trigo y ello puede estar motivado porque se encuentra más adaptada a las condiciones hídricas del semiárido español, siendo muy resistente a los déficits de humedad (González *et al.*, 1999). En el sector central del valle del Ebro, Martínez-Cob *et al.* (1998) indican que las necesidades hídricas del trigo son superiores a las de la cebada, lo que hace a esta más resistente a las sequías.

Finalmente, la aproximación considerando datos comarcales también muestra que las producciones agrícolas están muy determinadas por las condiciones de sequía. No obstante, se ha comprobado que en las áreas más húmedas las reducciones de producción en los años secos son inferiores a las que se producen en los sectores más áridos. Ello indica que la respuesta a las sequías puede resultar muy contrastada en el área de estudio, incluso dentro de cultivos del mismo tipo. Por esta razón, son necesarios estudios de más detalle, en más áreas para recoger toda la posible variabilidad espacial existente en la respuesta de las producciones agrícolas, con relación a las condiciones climáticas.

En diferentes países del mundo funcionan de forma operativa o se están desarrollando sistemas de seguimiento de las sequías climáticas cuyo objetivo es detectarlas de forma temprana, y delimitar en el espacio, de forma detallada, su extensión superficial e intensidad, con la finalidad de mitigar sus consecuencias (Svoboda *et al.,* 2002; Wilhite y Svoboda, 2000). Tanto en el caso de las sequías, como en el de otros riesgos

naturales, las medidas encaminadas a su gestión deberían basarse en una preparación previa a partir de un conocimiento detallado de cómo se comporta el fenómeno extremo. A pesar de ello, si exceptuamos los casos de EE.UU. (NDMC, 2003), Canadá (AGRC, 2003), Sudáfrica (Monnik, 2000) o Australia (Laughlin y Clark, 2000), en la mayor parte de las áreas en la que la recurrencia de las sequías es alta, como es el caso de la región mediterránea, cuando se produce un desastre, los gobiernos se centran en la identificación del impacto y en la reconstrucción para retornar a un estado de pre-desastre. Mucha menor atención se ha puesto en la preparación y predicción, y en la puesta en marcha de acciones de alerta temprana que podrían reducir impactos futuros y hacer que cuando se produzca un episodio extremo se precise menor atención gubernamental.

Para lograr una más adecuada gestión de las sequías, Wilhite (1991, 1996) publicó una metodología para la planificación de este tipo de riesgo que ha sido ampliamente seguida en EE.UU. Este método se planteó como genérico y adaptable a las necesidades de cualquier nivel de gestión y gobierno. El aspecto clave sería el desarrollo de un sistema de alerta temprana de las sequías con el que se podrán identificar las sequías con prontitud, pudiendo actuar ante las mismas de forma más eficaz.

Dada la frecuencia y severidad con que se producen las sequías en el sector central del valle del Ebro, y como consecuencia de los importantes impactos que producen en las áreas de condiciones más limitantes del valle, unos adecuados planes de seguimiento y prevención de las sequías serían muy útiles. Por esta razón, se ha desarrollado y sometido a examen un sistema de alerta temprana de las sequías en las tierras medias del Ebro para facilitar su gestión y limitación de las consecuencias negativas. Para ello se utiliza información climática, índices de sequía, sistemas de información geográfica y teledetección. Con el sistema se puede determinar la intensidad de la sequía a escala municipal de forma instantánea, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica, con las ventajas que ello tiene para conocer las condiciones de sequía y determinar las medidas de gestión oportunas.

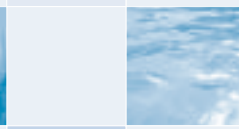
Se ha señalado que la operatividad del sistema estaría garantizada mediante el uso de información en tiempo real, procedente de estaciones automáticas, que permitiera su recepción, proceso automático, el cálculo de índices de resolución mensual o semanal a diferentes escalas temporales [que permitieran el seguimiento de sequías de carácter agrícola o ambiental (escala de 3 – 6 meses, Vicente-Serrano y Cuadrat, 2002) o sequías hidrológicas (12 meses, Szalai *et al.,* 2000)], y la creación de las cartografías finales. El sistema de seguimiento podría completarse por medio de índices de vegeta-

ción, procedentes de imágenes de satélite, lo que permitiría determinar, además de la intensidad y extensión superficial de las sequías en tiempo real, los daños que éstas provocan sobre la cubierta vegetal. Esta información completaría una precisa visión sobre la severidad y extensión superficial de la sequía, y los daños que pueden esperarse de ella.

La utilidad del sistema de seguimiento se ha validado mediante producciones agrícolas. Con ello se ha comprobado, además, su gran potencial para la predicción temprana, con unos meses de antelación, de las cosechas con una gran precisión. La relación entre las producciones finales de cereal de secano y el VCI durante el periodo de crecimiento (abril) es muy estrecha, pues, en general, coinciden los años con bajos valores de VCI y las bajas producciones de cereal.

Así pues, para la gestión de las sequías es necesario disponer de una adecuada información accesible en tiempo real que ayude a la toma de decisiones. El sistema propuesto y testado se ha mostrado de gran utilidad en este sentido, lo que avala la utilidad del desarrollo de programas previos que permitan hacer frente, con mayor eficacia, a los impactos de las sequías. Ello, sin duda, mejorará los resultados que se obtienen de las frecuentes intervenciones post-impacto que, en general, son inefectivas y fuera de tiempo (Wilhite, 1986 y 1993). En España se han destinado pocos esfuerzos al desarrollo de programas previos de planificación de las sequías (Morales y Rico, 1996; Morales *et al.,* 2000), lo que incide en una vulnerabilidad socioeconómica superior, ya que se corre el riesgo de detectar la sequía cuando ésta ha alcanzado proporciones críticas. La gestión del riesgo de sequías se debe basar, pues, en una adecuada planificación (Wilhite, 1996) donde la creación de un sistema de alerta temprana de las sequías resulta fundamental (Wilhite y Svoboda, 2000).

conclusiones



11. conclusiones

A continuación se enumeran las principales conclusiones obtenidas en el trabajo.

- Existen significativos contrastes espaciales en el comportamiento de la vegetación dentro del área de estudio, incluso dentro de un mismo tipo de uso del suelo. En las áreas de secanos herbáceos, matorrales y pastizales, el periodo vegetativo es muy corto y el rango de variación anual del NDVI es muy significativo. Los bosques, ubicados en el norte del área de estudio, y los cultivos de regadío son los usos de mayor productividad. Frente a ello, los espacios más áridos del centro del valle, con una escasa cubierta vegetal son los menos productivos.

- La actividad vegetal muestra una gran variabilidad espacial y estacional. Se han identificado 4 patrones espaciales indicativos de esta actividad vegetal en el área de estudio. Existe un claro componente estacional relacionado con los periodos en los que se produce la mayor actividad vegetal en las áreas de cultivos de regadío (verano), cultivos de secano (primavera) y bosques de coníferas (invierno), espacios que muestran mayor actividad que el resto de los usos del suelo durante las estaciones referidas.

- Las características climáticas medias tienen un importante papel en el reparto de la producción vegetal media. Se registra una relación positiva y estadísticamente significativa entre las precipitaciones medias y la producción de biomasa vegetal dentro del área de estudio.

- Las áreas de mayor variabilidad en el NDVI corresponden a los espacios de condiciones climáticas más limitantes, en las que se registra una mayor aridez. La variabilidad interanual del NDVI es superior en los espacios de menor cubierta y biomasa vegetal y, sobre todo, durante los meses invernales y primaverales.

- El análisis de la evolución temporal del NDVI constata importantes diferencias interanuales. Los años 1987 y 1988 indican una alta actividad vegetal, al igual que 1997, 1998 y 1999. Sin embargo, entre 1989 y 1996 la actividad vegetal se mantuvo en niveles muy inferiores, sobre todo en 1995 y 1996, años con la menor actividad vegetal de entre todos los analizados.

- La evolución temporal de las variables climáticas y de las series de NDVI indica que los ritmos estacionales y las diferencias interanuales en la actividad vegetal están

explicadas, en gran medida, por la evolución interanual en los valores de balance hídrico del suelo. No obstante, las diferencias espaciales son muy importantes. Las precipitaciones muestran un menor peso al explicar la evolución temporal mensual de los valores de NDVI. La ETP determina la dinámica de las áreas de bosques y regadíos, mientras que la actividad vegetal en los secanos, matorrales y pastizales está controlada, fundamentalmente, por el balance hídrico del suelo, tanto los ciclos anuales, como las diferencias interanuales de magnitud en los mismos.

- En general, la correlación mensual entre precipitaciones y NDVI no resulta significativa, y las variables que ejercen una mayor influencia sobre la actividad vegetal son la ETP y el balance hídrico del suelo. También se ha comprobado que la variabilidad temporal del NDVI y su respuesta a las variables climáticas puede ser muy contrastada en función de la localización geográfica. Como ejemplo más llamativo: los secanos ubicados en las áreas más húmedas muestran una baja variabilidad interanual y un menor control del NDVI por parte de las variables climáticas. En cambio, en las zonas más áridas la variabilidad interanual del NDVI es muy alta, y está muy relacionada con la dinámica del balance hídrico del suelo.

- Con relación a las diferencias interanuales del NDVI, éstas están determinadas, principalmente, por la influencia de las condiciones climáticas. No obstante, se comprueba que las diferentes variables (precipitación, ETP y balance hídrico) influyen de forma diferenciada en función de los usos del suelo. Además, la influencia de estas variables cambia a lo largo del año, siendo la primavera y el verano las estaciones en las que la vegetación es más sensible a las condiciones de humedad.

- Con relación al impacto de las sequías sobre la dinámica vegetal, se indica que las diferencias interanuales en los valores de NDVI están condicionadas, principalmente, por los índices de sequía computados a la escala temporal de 24 meses, además de por las condiciones concretas a menor escala temporal (3 meses). Sin embargo, en este caso las diferencias espaciales en dicha influencia son también notables. En general, las diferencias interanuales del NDVI en los bosques están determinadas en menor medida por el SPI a escalas temporales cortas, en comparación con los cultivos de secano, matorrales y pastizales, en los que los déficits anuales y en determinados meses pueden tener significativas consecuencias sobre el desarrollo de la cubierta vegetal.

- El análisis realizado en diferentes áreas representativas indica que en los sectores más húmedos la respuesta vegetal a los índices de sequía es inferior que en las áreas más secas. No obstante, mientras la explicación es alta en las áreas de matorrales y pastizales y en los cultivos de secano, en los bosques la respuesta es inferior, independientemente de su localización geográfica. En general, las sequías afectan más a la vegetación que se ubica en el centro de la depresión, donde las condiciones climáticas son más limitantes, la productividad vegetal baja y la variabilidad interanual de los valores de NDVI muy alta. De esta forma, las áreas más afectadas por las condiciones climáticas coinciden con las formaciones vegetales más alteradas y modificadas por el hombre y que se localizan en sus límites de distribución bioclimática.

- Se ha comprobado que entre enero y septiembre se produce una significativa asociación entre NDVI y SPI en las áreas de cultivos de secano, y de matorrales y pastizales. Los bosques muestran correlaciones inferiores a las de los anteriores usos del suelo en los meses primaverales e invernales. Es durante los meses estivales cuando se registran las correlaciones más elevadas, con escasas diferencias entre los diferentes usos del suelo.

- En el conjunto del área de estudio se comprueba que la actividad relativa de la vegetación muestra variaciones temporales notables, con cambios bruscos entre unos meses y otros. A pesar de ello, se reconoce que entre 1988 y 1989 se registraron condiciones de elevada actividad vegetal relativa, mientras que a partir de 1989 se produce un considerable descenso en dicha actividad vegetal relativa, que se prolonga hasta inicios de 1997. Este periodo muestra una gran variabilidad temporal. Entre 1997 y 2000 hay otro periodo de mayor actividad vegetal en el que las variaciones temporales no son tan bruscas. Entre 1989 y 1996 se sucedieron una serie de fases caracterizadas por bajos valores de VCI que afectaron a amplias áreas.

- La respuesta de la vegetación a los índices de sequía no se registra a una única escala temporal, sino que se podría considerar la respuesta combinada de la vegetación a déficits hídricos de diferente escala temporal. La gran variabilidad espacial que introducen las diferentes cubiertas y usos del suelo supone que haya formaciones vegetales distintas, que pueden responder de manera contrastada a los déficits hídricos de diferente magnitud o duración.

- La evolución temporal de la actividad vegetal relativa, cuantificada de forma continua, responde, en sus patrones generales, a la evolución reflejada por el SPI a la esca-

la temporal de 24 meses, con un amplio periodo, entre 1990 y 1996, con valores negativos de SPI, coincidente con un generalizado descenso de las condiciones de actividad vegetal relativa. Sin embargo, las variaciones de alta frecuencia responden, en mayor medida, a las variaciones temporales del índice de sequía a las escalas temporales de 3 y 6 meses

- La variabilidad interanual en las producciones agrícolas resulta muy elevada, aunque existen importantes contrastes temporales. En las décadas de 1949 y 1950 se detecta una mayor variabilidad temporal en las series. Sin embargo, desde el año 1960 se asiste a un claro descenso de las producciones de cereal.

- Los resultados indican que las producciones vegetales están más condicionadas por las precipitaciones que se registran durante determinadas estaciones, fundamentalmente durante las fases de crecimiento de la vegetación: en los meses de germinación (invierno) y en los de maduración (mayo). No obstante, mediante la acumulación temporal que permiten los índices de sequía, se comprueba que las cosechas finales están determinadas, en mayor medida, por las condiciones de humedad a lo largo de todo el año agrícola, resumidas a partir del SPI a la escala de 12 meses.

- El descenso de las cosechas de trigo está acompañado de una disminución de los índices de sequía desde la década de 1960, con tendencias negativas y significativas en ambos parámetros. No obstante, el descenso es superior en el caso de las cosechas que en el del SPI. El 55 % de la varianza de las producciones de trigo es explicada por el SPI. Sin embargo, se ha identificado una tendencia hacia la subestimación de las cosechas considerando los valores de SPI. Los análisis han mostrado que la subestimación y el mayor descenso de las producciones, con relación al SPI, pueden estar causadas por un aumento térmico.

- En el caso de la cebada se ha comprobado también un descenso de la productividad paralelo al descenso en los valores de SPI, pero en este caso se indica que el ascenso térmico no tiene un efecto negativo sobre las producciones. Este desigual comportamiento puede estar condicionado por las diferentes adaptaciones de los cultivos a las sequías.

- Se ha comprobado que en las áreas más húmedas las reducciones de producción en los años secos son inferiores a las que se producen en los sectores más áridos,

lo que indica que la respuesta a las sequías puede resultar muy contrastada en el área de estudio, incluso dentro de cultivos del mismo tipo.

- Se ha mostrado la utilidad de un sistema de seguimiento de las sequías, que considera información espacio-temporalmente continua, basado en la aplicación de índices de sequía, y el uso de Sistemas de Información Geográfica e imágenes de satélite. Con el sistema se puede determinar la intensidad de la sequía a escala municipal de forma instantánea, con las ventajas que ello tiene para conocer las condiciones de sequía y determinar las medidas de gestión oportunas.

- La operatividad del sistema quedaría garantizada mediante el uso de información en tiempo real, procedente de estaciones automáticas.

- Además del sistema de seguimiento, se ha desarrollado un método de predicción probabilístico para anticipar, tanto en el tiempo como en el espacio, las condiciones de sequía. Se ha explicado el procedimiento estadístico para el cálculo de las probabilidades de sequía, así como su integración en un Sistema de Información Geográfica.

- También se ha ilustrado que como sistema de seguimiento podría completarse por medio de índices de vegetación, procedentes de imágenes de satélite, lo que permitiría determinar, además de la intensidad y extensión superficial de las sequías en tiempo real, los daños que éstas provocan sobre la cubierta vegetal. Esta información completaría una precisa visión sobre la severidad y extensión superficial de la sequía, y los daños que pueden esperarse de ella.

- La utilidad del sistema de seguimiento se ha validado mediante producciones agrícolas. Con ello se ha comprobado, además, su gran potencial para la predicción temprana de las cosechas con una gran precisión. La relación entre las producciones finales de cereal de secano, y el VCI durante el periodo de crecimiento (abril) es muy estrecha.

- Mediante la integración de los valores de VCI y SPI en un modelo de regresión múltiple (*stepwise*), más del 70 % de la variabilidad de las producciones de cereal son explicadas por la información que integra el sistema de seguimiento de las sequías. Gracias a ello, los valores predichos por el modelo coinciden con las producciones realmente observadas. Con ello se pueden anticipar las producciones finales de cereal con hasta 3 meses de antelación de forma muy precisa.

Referencias bibliográficas

referencias bibliográficas

Abrams, M.D., Schultz, J.C. y Kleiner, K.W., (1990): Ecophysiological responses in mesic versus xeric hardwood species to an early-season drought in central Pennsyvania. *Forest Science.* 36: 970-981.

Abrams, M.D., Ruffuer, M.C. y Morgan, T.A., (1998): Tree-ring responses to drought across species and contrasting sites in the ridge and valley of central Pennsylvania. *Forest Science,* 44: 550-558.

Agnew, C.T., (2000): Using the SPI to Identify drought. *Drought Network News.* 12 (1): 6-12.

Agnew, M.D. y Palutikof, J.P., (2000): GIS-based construction of base line climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate Research*. 14: 115-127.

AGRC., (2003): Agriculture and Agri-Food in Canada. Drought Wartch. http://www.agr.gc.ca/pfra/drought/default.htm. Última visita: 12 de agosto de 2003.

Akinremi, O.O., McGinn, S.M., y Barr, A.G., (1996): Evaluation of the Palmer Drought Index on the canadian praires. *Journal of Climate,* 9: 897-905.

Alberto, F. y Machín, J., (1978): Delimitación de suelos con régimen de humedad árido en la depresión media del Ebro. *Trabajos Compostelanos de Biología,* 6: 30-45.

Alexandersson, H. y Moberg, A., (1997): Homogenization of Swedish temeperature data. Part I: Homogeneity test for lineal trends. *International Journal of Climatology.* 17: 25-34.

Alexandrov, V.A., (1997): Vulnerability of agronomic systems in Bulgaria. *Climatic Change,* 36: 135-149.

Alexandrov, V.A. y Hoogenboom, G., (2000): The impact of climate variability and change on crop yoeld in Bulgaria. *Agricultural and Forest Meteorology.* 104: 315-327.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M., (1998): *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requeriments*. Irrigation and drainage paper 56. FAO. Roma. Italia.

Alley, W.M., (1984): The Palmer drought severity index: limitations and applications. *Journal of Applied Meteorology,* 23: 1100-1109.

Aman, A., Randriamanantena, H.P., Podaire, A. y Frouin, R., (1992): Upscale Integration of Normalized Difference vegetation Index: the problem of spatial heterogeneity. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing.* 30: 326-337.

Andres, L., Salas, W.A. y Skole, D., (1994): Fourier analysis of multi-temporal AVHRR data applied to land cover classification. *International Journal of Remote Sensing,* 15: 1115-1221.

Anyamba, A. y Eastman, J.R., (1996): Interannual variability of NDVI over Africa and its relationship to El Niño/Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing.* 15: 1115-1221.

Ascaso, J., (1997): *Variabilidad y riesgos climáticos y sus repercusiones en el paisaje natural y agrario. Análisis bioclimático y cuantificación de daños ocasionados por las sequías mediante teledetección y sistemas de información geográfica.* Tesis doctoral (inédita). Universidad Complutense de Madrid.

Ashcroft, P.M., Catt, J.A., Curran, P.J., Munden, J. y Webster, R., (1990): The relation between reflected radiation and yield on the Broadbelk winter wheat experiment. *International Journal of Remote Sensing.* 11: 1821-1836.

Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., y Hatfield, J.L., (1984): Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal,* 76: 300-312.

Atkinson, P.M., (1997): Geographical information science. *Progress in Physical Geography* 21: 573-582.

Austin, R.B., Cantero-Martínez, C., Arrúe, J.L., Playán, E. y Cano-Marcellán, P., (1998): Yield-rainfall relationships in cereal cropping systems in the Ebro river valley of Spain. *European Journal of Agronomy,* 8: 239-248.

Austin, R.B., Playán, E. y Gimeno, J., (1998b): Water storage in soils during the fallow: prediction of the effects of rainfall pattern and soil conditions in the Ebro valley of Spain. *Agricultural Water Management,* 36: 213-231.

Ayala-Carcedo, F.J. y Cubillo-Nielsen, S., (2002): Funciones ecológicas, económicas y evolutivas de los desastres y calamidades naturales. En *Riesgos naturales* (J. Olcina y F.J. Ayala-Carcedo Eds.). Ariel. Barcelona: 89-101.

Bacchi, B. y Kottegoda, N.T., (1995): Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall. *Journal of Hydrology*, 165: 311-348.

Balling, R.C., (1989): Impact of desertification on regional and global warming. *Bulletin of the American Meteorological Society* 72: 232-234.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. y Huete, A.R. (1995): A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews.* 13: 95-120.

Baret, F. y Guyot, G., (1991): Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment.* 35: 161-173.

Barron, J., Rockström, J., Gichuki, F. y Hatibu, N., (2003): Dry spell analysis and maize yields for two semi-arid locations in east Africa. *Agricultural and Forest Meteorology.* 117: 23-37.

Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M. y García-Ruiz, J.M., (2003): Assessing the Effect of Climate Oscillations and Land-use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32: 283-286

Bennie, A.T.P. y Hensley, M., (2001): Maximizing precipitation utilization in dry-land agriculture in South Africa – a review. *Journal of Hydrology,* 241: 124-139.

Bhalme, H.N. y Mooley, D.A., (1980): Large scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review.* 188: 1197-1211.

Bigg, G.R., (1991): Kriging and intraregional rainfall variability in England. *International Journal of Climatology* 11: 663-675.

Blennow, K. y Persson, P., (1998): Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and Forest Meteorology* 89: 59-71.

Bonifacio, R., Dugdale, G. y Milford, J.R., (1993): Sahelian rangeland production in relation to rainfall estimates from Meteosat. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 2695-2711.

Borrough, P.A. y McDonnell, R.A., (1998): *Principles of Geographical Information Systems.* Oxford University Press, Oxford.

Braswell, B.H., Schimel, D.S., Linder, E. y Moore III, B., (1997): The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability. *Science.* 278: 870-872.

Braun-Blanquet, J. y Bolós, O., (1954): datos sobre las comunidades terofíticas de las llanuras del Ebro medio. *Collectanea Botanica,*4: 235-242.

Braun-Blanquet, J. y Bolós, O., (1957): Les groupements vegetaux du bassin de l'Ebre. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei,* 5, nº 1-4.

Briffa, K.R., Jones, P.D. y Hulme, M., (1994): Summer moisture variability across Europe, 1892-1991: an analysis based on the Palmer drought severity index. *International Journal of Climatology*. 14: 475-506.

Brown D.P. y Comrie, A.C., (2002): Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. Climate Research 22: 115-128.

Bruwer, J.J., (1993): Drought policy in the Republic of South Africa. En (D.A. Wilhite ed.) *Drought assessment, management and planning: theory and case studies.* Kluwer. Oston.

Bryceson, K.P., (1993): Locust survey and drought monitoring – two case studies of the operational use of satellite data in Australian government agencies. *ITC Journal.* 1993-3: 267-275.

Burgess, D.W., Lewis, P. y Muller, J.P.A.L., (1995); Topographic effects in AVHRR-NDVI data. *Remote Sensing of Environment,* 54: 223-232.

Burton, I., Kates, R.W. y White, G.F., (1978): *The environment as hazard*. Oxford University Press. Nueva York, 240 pp.

Calle, A., Casanova, J.L., Romo, A. y González-Alonso, F.,(2000): An operational system for the forest fire risk assessment by means of NOAA images. Pages 363-368 en J.L. Casanova (ed.) *Remote Sensing in the 21st Century: economic and environmental applications.* Balkema. Rotterdam.

Carlson, T.N., y Ripley, D.A., (1997): On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment.* 62: 241-252.

C.C.Col., (2002): *Colorado Climate Center. http://ccc.atmos.colostate.edu/*

Cihlar, J., StLaurent, L. y Dyer, J.A., (1991): The relation between normalized difference vegetation index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment,* 35: 279-298.

Collado, A.D., Chuvieco, E. y Camarasa, A., (2002): Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 52: 121-133.

Cressie, N., (1990): The origins of kriging. *Mathematical Geology* 22: 239-253.

Creus, (1983): *El clima del alto Aragón occidental.* Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos, 109. 233 pp. Jaca.

Creus, J. y Ferraz, J., (1995): Irregularidad pluviométrica y continentalidad térmica en el valle medio del Ebro. *Lucas Mallada,* 7: 147-164.

Cuadrat, J.M., (1986): *El sistema agrario aragonés.* Institución Fernando El Católico. Zaragoza.

Cuadrat (1999): El clima de Aragón. Cai 100. 109 pp. Zaragoza.

Cuadrat, J.M., (2001): Percepción de la sequía en la fachada cantábrica. En (A. Gil-Olcina y A. Morales-Gil Eds.) *Causas y consecuencias de las sequías en España.* 277- 302. Universidad de Alicante.

Cuadrat, J.M. y Gómez-Aparisi, J., (2001): Agua y sequía en Aragón: incidencia en el sector agrario. *6ª Conferencia Internacional: Economía del Agua.* Publicación en CD. IBERDROLA.

Curran, P.J., (1980): Multispectral remote sensing of vegetation amount. *Progress in Physical Geography,* 4: 315-341.

Curran, P.J., (1987): Remote sensing in agriculture: an introductory review. *Journal of Geography,* 86: 147-156.

Curran, P.J. y Atkinson, P.M., (1998): Geostatistics and remote sensing. *Progress in Physical Geography* 22: 61-78.

Changnon, S.A. y Easterling, W.E., (1989): Measuring drought impacts: the Illinois case. *Water Resources Bulletin.* 25: 27-42.

Chapman L. y Thornes J.E., (2003): The use of geographical information systems in climatology and meteorology. *Progress in Physical Geography*, 27: 313-330.

Chauvelier F., (1990): *La repoblación forestal en la provincia de Huesca y sus impactos geográficos.* Instituto de Estudios Altoaragoneses n° 34. Huesca. 164 p.

Chávez, P.S., (1988): An improved dark-object substraction tecnique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.

CHE (2003): Confederación hidrográfica del Ebro. Página web: www.chebro.es

Che, N. y Price, J.C., (1992): Survey of radiometric calibration results and method for visible and near infrared channels of NOAA –7, -9 and –11 AVHRRs. *Remote Sensing of Environment.* 41: 19-27.

Chipanshi, A.C., Ripley, E.A. y Lawford, R.G., (1999): Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model. *Agricultural Systems.* 59: 57-66.

Chmielewski, F.M. y Köhn, W., (1999): Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agricultural and Forest Meteorology.* 96: 49-58.

Choudhury, B.J., (1987): Relationships between vegetation indices, radiation absorption and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment,* 22: 209-233.

Chuvieco, E., (2002): *Teledetección ambiental.* Ariel Ciencia. Barcelona.

Chuvieco, E., Salas, J., Meza, E. y Vargas, F., (2002): Empleo de la teledetección en el Análisis de la deforestación tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela). *Serie Geográfica*, 10: 55 - 76.

Dadhwall, V.K. y Sridhar, V.N., (1997): A non-linear regression form for vegetation index-crop yield relation incorporating acquisition date normalization. *International Journal of Remote Sensing,* 18: 1403-1408.

Dalezios, N.R., Papazafirou, Z.G., Papamichail, D.M. y Karacostas, T.S., (1991): Drought assessment for the potential of precipitation enhancement in northern Greece. *Theoretical and Applied Climatology* 44: 75-88.

Das, D.K., Mishra, K.K. y Kalra, N., (1993): Asasessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 3081-3092.

Davenport, M.L. y Nicholson, S.E., (1993): On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in east Africa. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 2369-2389.

De los Ríos, F., (1984): *El agua en la cuenca del Ebro.* Institución fernando el Católico. Zaragoza, 145 p.

De Paw, E., Göbel, W. y Adam, H., (2000): Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones. *Agricultural and Forest Meteorology,* 103: 43-58.

Desir, G., (2001): *Erosión hídrica de terrenos yesíferos en el sector central del la Depresión del Ebro.* Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza. 326 pp.

Di, L., Rundquist, D.C., y Han, L., (1994): Modelling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. *International Journal of Remote Sensing,* 15: 2121-2136.

Diallo, O., Diouf, A., Hanan, N.P., Ndiaye, A. y Prévost, Y., (1991): AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing.* 12: 1259-1279.

Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. y Terradas, J., (2002): Satellite evidence of decreasing resilience in mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology.* 83: 2293–2303.

Dingman, S.L., Seely-Reynolds, D.M. y Reynolds, R.C., (1988): Application of kriging to estimating mean annual precipitation in a region of orographic influence. *Water Resources Bulletin*, 24: 329-339.

Dolph, J. y Marks, D., (1992): Characterizing the distribution of observed precipitation and runoff over the continental United States. *Climatic Change,* 22: 99-119.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O., (1976): *Las necesidades de agua de los cultivos.* Estudio FAO: Riego y drenaje. FAO. Roma. 194 pp.

Dracup, J.A., Lee, K. y Paulson, E.G., (1980): On the definition of droughts. *Water Resources Research.* 16: 297-302.

Droogers, P. y Allen, R.G., (2002): Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems.* 16: 33-45.

Duncan, J., Stow, D., Fanklin, J. y Hope, J., (1993): Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 3395-3416.

Dupigny-Giroux, L.A., (1999): Drought follows the deluge in Vermont. *Drought Network News,* 11: 8-14.

Eastman, J.R. y Fulk, M.A., (1993): Long sequence time series evolution using standardized principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 53: 1649-1658.

Eder, B.K., Davis, J.M. y Monahan, J.F., (1987): Spatial and temporal analysis of the Palmer drought severity index over the south-eastern united States. *Journal of Climatology,* 7: 31-51.

Edwards, K.A., (1972): Estimating areal rainfall by fitting surfaces to irregularly spaced data. In: *Proceedings of the International Symposium on the Distribution of Precipitation in Mountainous Areas* 2. World Meteorological Organisation 326, Geneva, p 565-587.

Edwards, D.C., (2001): *Methodology of SPI*. Disponible on-line en http://ccc.atmos.colostate.edu/SPI.htm. Última visita 6-II-2002.

Edwards, D.C. y McKee, T.B., (1997): *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Atmospheric Science Paper No. 634.

Ehrlich, D., Estes, J.E. y Singh, A., (1994): Applications of NOAA-AVHRR 1 km data for environmental monitoring. *International Journal of Remote Sensing.* 15: 145-161.

Errea, M.P. y Lasanta, T., (1993): Política agraria comunitaria y retirada de tierras de cultivo en Aragón (1989-1992). *Revista de Estudios Agrosociales.* 164: 43-60.

Evans, S.P., Mayr, T.R., Hollis, M.J. y Brown, C.D., (1999): SWBCM: a soil water balance capacity model for environmental applications in the UK, *Ecological Modelling*, 121: 17-49.

Fang, J., Piao, S., Tang, Z., Peng, C y Ji, W., (2001): Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science.* 293: 1723.

Farrar, T.J., Nicholson, S.E. y Lare, A.R., (1994): The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana II: NDVI response to soil moisture. *Remote Sensing of Environment,* 50: 121-133.

Ferrer, C., (1988): Los recursos pascícolas del Pirineo aragonés. En *Actas de la XXVIII Reunión Científica de la Sociedad Española para el estudio de los Pastos:* 23-65.

Fleming, M.D., Chapin, F.S., Cramer, W., Hufford, G.L. y Serreze, M.C., (2000): Geographic patterns and dynamics of Alaskan climate interpolated from a sparse station record. *Global Change Biology,* 6: 49-58.

Flores, V., Campanero, A. y Escudero, R., (2001): El sistema de vigilancia y alerta temprana de situaciones de sequía agrícola del M.A.P.A. a partir de datos diarios NOAA-AVHRR. En *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global.* (J.I. Rosell y J.A. Martínez-Casasnovas Eds.). 86-90.

Florinsky, I.V. y Kuryakova, G.A., (1996): Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena,* 27: 123-141.

Frère, M. y Popov, G. F. (1986): *Pronóstico Agrometeorológico del Rendimiento de los Cultivos*. Estudio FAO de Producción y Protección Vegetal No. 73. FAO. Roma, Italia. 172.

Fritts, H.C., (1976): *Tree rings and climate.* Academic Press. Londres.

Frutos, L.M., (1976): *Estudio geográfico del campo de Zaragoza.* CSIC. 342 pp.

Frutos, L.M., (1982): *El campo en Aragón.* Librería General. Zaragoza. 195 pp.

Frutos, L.M. (ed.) (1994): *Enciclopedia temática de Aragón (Geografía).* El Periódico de Aragón.

Fuller, D.O., (1998): Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal, 1987-1993: *International Journal of Remote Sensing.* 19: 2013-2018.

Fung, T. y LeDrew, E., (1987): Applications of principal components in change detection. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 53: 1649-1658.

Gallo, K.P. y Flesch, T.K., (1989): Large-area crop monitoring with the NOAA AVHRR: estimating the silking stage of corn development. *Remote Sensing of Environment.* 27: 73-80.

Garcia-Ruiz, J.M., Puigdefábregas, J. y Creus, J., (1985): *Los recursos hídricos superficiales del alto Aragón.* Colección de Estudios Altoaragoneses, 2: 224 pp. Huesca.

Gil, A. y Morales, A., (2001): *Causas y consecuencias de las sequías en España.* Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante. 574 pp.

Gilabert, M.A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J., (1997): Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección.* 8: 35-45.

Gillies, R.R., Carlson, T.N., Cui, J., Kustas, W.P. y Humes, K.S., (1997): A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing,* 18: 3145-3166.

Gitelson, A., Kogan, F., Spivak, L., Zakarin, E. y Lebed, L., (1996): Estimation of seasonal dynamics of pasture and crop productivity in Kazakhastan using NOAA/AVHRR data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1: 209-211. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. USA.

Gitelson, A.A., Kogan, F., Zakarin, E., Spivak, L. y Lebed, L., (1998): Using AVHRR data for quantitative estimation of vegetation conditions: calibration and validation. *Advances in Space Research,* 22: 673-676.

González, A., Martín, I. y Ayerbe, L., (1999): Barley yield in water-stress conditions. The influence of precocity, osmotic adjustment and stomatal conductance. *Field Crop Research.* 62: 23-34.

González-Alonso, F. y Casanova, J.L., (1997): Application of NOAA-AVHRR images for the validation and risk assessment of natural disasters in Spain. En *Remote Sensing'96.* (Spiteri Ed.). Balkema. Rotterdam: 227-333.

González-Alonso, F., Cuevas, J.M., Casanova, J.M., Calle, A. e Illera, P. (1995): Drought monitoring in Spain using satellite remote sensing. In *Sensors and environmental applications of remote sensing* (Askne. Ed). Balkema. Rotterdam. 88-90.

González-Alonso, F., Vázquez, A., Cuevas, J.M., Calle, A. y Casanova, J.L., (2000): Towards an operational monitoring of drought conditions in Spain using satellite images. En *remote sensing in the 21st century: economic and environmental applications.* (Casanova, J.L. Ed.). Balkema. Rotterdam: 403-405.

González-Alonso, F., Calle, A., Vázquez, A., Casanova, J.L., Cuevas, J.M. y Romo, A., (2001): Seguimiento de la sequía en España, en el año 2000, mediante técnicas de teledetección espacial. En *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global.* (J.I. Rosell y J.A. Martínez-Casasnovas Eds.). 83-85.

González-Hidalgo, J.C., De Luis, M., Stepanek, P., Raventós, J. y Cuadrat, J.M., (2002): Reconstrucción, estabilidad y procesos de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. En *La información climática como herramienta de gestión ambiental* (Cuadrat, J.M, Vicente, S.M. y Saz, M.A Eds.): 47-57. Zaragoza.

Goovaerts, P., (1997): *Geoestatistics for natural resources evaluation.* Oxford University Press, New York.

Goward, S.N. y Prince, S.D., (1995): Transient effects of climate on vegetation dynamics: satellite observations. *Journal of Biogeography.* 22: 549-563.

Goward, S.N., Markam, B., Dye, D.G., Dulaney, W. y Yang, J., (1991): Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer, *Remote Sensing of Environment.* 35: 257-277.

Goward, S.N., Dye, D.G., Turner, S. y Yang, J., (1993): Objective assesment of the NOAA global vegetation index data. *International Journal of Remote Sensing,* 14: 3365-3394.

Groten, S.M.E., (1993): NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1495-1515.

Groten, S.M.E. y Ocatre, R., (2002): Monitoring the lenght of the growing season with NOAA. *International Journal of Remote Sensing.* 23: 2797-2815.

Gruszczyuska, M., Dabrowska-Zielinska, K., Stankiewicz, K. y Janowska, M., (1998): Remote Sensing data dor monitoring conditions of cereals. En *Future trends in Remote Sensing* (P. Gudmandsen Ed.). Balkema. Rotterdam: 243-249.

Guerrero, J., Alberto, F., Hodgson, J., García-Ruiz, J.M. y Montserrat, G., (1999): Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain. 1. Interactions with topographic factors and soil erosion. *Journal of Arid Environments*, 41, 401-410.

Gutman, G., (1990): Towards monitoring droughts from space. *Journal of Climate,* 3: 282-295.

Gutman, G.G., (1991): Vegetation indices from AVHRR. An update and future prospects. *Remote Sensing of Environment,* 35: 121-136.

Gutman, G. e Ignatov, A., (1995): Global land monitoring from AVHRR: potential and limitations. *International Journal of Remote Sensing.* 16: 2301-2309.

Gutman, G.G., Tarpley, D. y Ohring, G., (1987): Cloud screening for determination of land surface characteristics in a reduced resolution satellite data set. *International Journal of Remote Sensing.* 8: 859-870.

Gutman, G., Tarpley, D. Ignatov, A. y Olson. S., (1995): The enhanced NOAA global land dataset from the advanced very high resolution radiometer. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 76: 1141-1156.

Gutman, G., Csiszar, I. y Romanov, P., (2000): Using NOAA/AVHRR Products to Monitor El Niño Impacts: Focus on Indonesia in 1997-1998. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 81: 1189-1205.

Guttman, N.B., (1998): Comparing the Palmer drought index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association.* 34: 113-121.

Guttman, N.B., (1999): Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association.* 35: 311-322.

Hafner, S., (2003): Trends in maize, rice, and wheat yields for 188 nations over the past 40 years: a prevalence of linear growth. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 97: 275-283.

Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W.C., (2000): *Análisis multivariante.* Prentice Hall. 799 pp.

Halpert, M.S., (1991): Climate monitoring using an AVHRR-based vegetation index. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* 90: 201-205.

Handler, P., (1990): USA cron yield, the el Niño and agricultural drought: 1867-1988. *International Journal of Climatology.* 10: 819-828.

Hanson, P.J. y Weltzin, J.F., (2000): Drought disturbance from climate change: response of United States forests. *The Science of the Total Environment.* 262: 205-220.

Hargreaves, G.L., (1985): Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 120: 1132-1139.

Hargreaves, G.L. y Allen, R.G., (2003): History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 129: 53-63.

Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H. y Riley, J.P., (1985): Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 111: 265-275.

Hargy, V.T., (1997): Objectively mapping accumulated temperature for Ireland. *International Journal of Climatology* 17: 909-927.

Hartmam, T., DiBella, C y Oricchio, P., (2003): Assessment of the possible drought impact on farm production in the SE of the province of Buenos Aires, Argentina. *ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,* 57: 281-288.

Havens, A.V., (1954): Drought and agriculture. *Weatherwise,* 7: 51-55.

Hayes, M.J. y Decker, W.L., (1996): Using NOAA-AVHRR data to estimate maize production in the United States Corn Belt. *International Journal of Remote Sensing.* 17: 3189-3200.

Hayes, M., Wilhite, D.A., Svoboda, M. y Vanyarkho, O., (1999): Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 429-438.

Heim, R.R., (2000): Drought indices: a review. En *Drought: a global assessment.* (D.A. Wilhite Ed.). Routledge: 159-167.

Heim, R.R., (2002): A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 83: 1149-1165.

Hellden, U. y Eklundh, L., (1988): *National drought impact monitoring a NOAA-NDVI and precipitation data study of Ethiopia.* Lund Studies in Geography, 15. Lund University Press.

Henricksen, B.L., (1986): Reflections on drought: Ethiopia 1983-1984. *International Journal of Remote Sensing.* 7: 1447-1451.

Henricksen, B.L. y Durkin, J.W., (1986): Growing period and drought early warning in Africa using satellite data. *International Journal of Remote Sensing.* 7: 1583-1608.

Hernández, M.L., (1992): *Climatología agrícola del valle medio del río Ebro.* Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.

Hielkema, J.V., Prince, S.D. y Astle, W.L., (1986): Rainfall and vegetation monitoring in the Savanna zone of Democrativ Republic Sudan using NOAA Advanced very high resolution radiometer. *International Journal of Remote Sensing,* 7: 1499-1514.

Higueras, A., (1981): Los suelos. En *Geografía de Aragón* (A. Higueras ed.): 185-203.

Holben, B., (1986): Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing.* 6: 1271-1328.

Holben, B.N., Kaufman, Y.J. y Kendall, J.D., (1990): NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration. *International Journal of Remote Sensing.* 11: 1511-1519.

Holm, A.M., Shane, R, Cridland, W. y Roderick, M.L., (2003): The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. *Remote Sensing of Environment*, 85: 145-158

Houghton, J.T., Ding, Y., Giggs, D., Noguet, M., van del Linden, P., Dai, X., Maskell, A. y Johnson, C.A., (2001): *Climate Change 2001: The scientific Basis.* Eds. Cambridge University Press. Cambridge.

Hudak, A., y Wessman, C.A., (2000): Deforestation in Mwanza District, Malawi, from 1981 to 1992, as determined from Landsat MSS imagery, *Applied Geography*, 20: 155-175

Huete, A.R. y Tucker, C.J., (1991): Investigation of soil influences in AVHRR red and near infra-red vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing,* 12: 1223-1242.

Hutchison, C.F., (1991): Uses of satellite data for famine early warning in sub-saharian Africa. *International Journal of Remote Sensing,* 12: 1405-1421.

Hutchinson, M.F., (1995): Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. International Journal of Geographical Information Systems 9: 385-403.

Ibáñez, J.J., Valero, B. y Machado, C., (1997): *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación.* Geoforma Ediciones. Logroño.

Ichii, K., Kawabata, A. y Yamaguchi, Y., (2002): Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. *International Journal of Remote Sensing.* 23: 3873-3878.

Illera, P., Delgado, J.A. y Calle, A., (1996): A navigation algorithm for satellite images. *International Journal of Remote Sensing.* 17: 577-588.

Illera, P., A. Fernández y J. Delgado., (1996b): Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. *International Journal of Remote Sensing.* 17: 1093-1105.

Illera, P. El-Kaouri, A. y Vegas, A., (1997): Influencia de las condiciones atmosféricas sobre el NDVI-AVHRR. En *Teledetección. Usos y aplicaciones.* Universidad de Valladolid: 415-422.

Janssen, B.H., (1972): The significance of the fallow year in the dry-farming suystem in the Great Konya Basin. *Neth J Agric Sci.* 20: 247-260.

Jasinski, M.F., (1990): Sensitivity of the Normalized Difference Vegetation Index to subpixel canopy cover, soil albedo, and pixel scale. *Remote Sensing of Environment.* 32: 169-187.

Jeffrey, S.J., Carter, J.O., Moodie, K.B. y Beswick, A.R., (2001): Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. *Environmental Modelling & Software,* 16: 309-330.

Jensen, M.E., Burman, R.D. y Allen, R.G., (1990): *Evapotranspiration and irrigation water requeriments.* ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice nº 70. American Society of Civil Engineers. Nueva York.

Ji, L. y Peters, A.J., (2003): Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment.* 87: 85-98.

Jones, P.D., Hulme, M., Briffa, K.R. y Jones, C.G., (1996): Summer moisture availability over Europe in the Hadley centre general circulation model based on the Palmer drought severity index. *International Journal of Climatology.* 16: 155-172.

Jones, P.D., Osborn, T.J. y Briffa, K.R., (2001): The evolution of climate over the last Millennium. *Science* 292: 662-667.

Jones, P.D. y Moberg, A., (2003): Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate* 16: 206-223.

Jonsson, S., Gunnarson, B. y Criado, C., (2002): Drought is the major limiting factor for tree-ring growth of high-altitude Canary island pines on Tenerife. *Geograkiska Annaler,* 84A: 51-71.

Justice, C.O., (1986): Monitoring the Grassland of semiarid Africa using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing.* 7: 1383-1395.

Justice, C.O. e Hiernaux, P.H.Y., (1986): Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA-AVHRR data. Niger, 1983. *International Journal of Remote Sensing,* 7: 1475-1497.

Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N. y Tucker, C.J., (1985): Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing,* 6: 1271-1318.

Justice, C.O., Holben, B.N. y Gwynne, M.D., (1986): Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing,* 7: 1453-1474.

Kalubarme, M.H., Potdar, M.B., Manjunath, K.R., Mahey, R.K. y Siddhu, S.S., (2003): Growth profile based crop yield models: a case studt of large area wheat yield modelling and its extendibility using atmospheric corrected NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing.* 24: 2037-2054.

Kanti, B., (1998): Coping mechanisms practised by drought victims (1994/5) in north Bengal, Bangladesh. *Applied Geography,* 18: 355-373.

Karl, T.R., (1983): Some spatial characteristics of drought duration in the United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology,* 22: 1356-1366.

Karl, T.R., (1986): The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and the Palmer z-Index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology,* 25: 77-86.

Karl, T.R. y Koscielny, A.J., (1982): Drought in the United States: 1895-1981. *Journal of Climatology,* 2: 313-329.

Karl, T.R., y Williams, C.N., (1987): An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities. *Journal of Climate and Applied Meteorology.* 26: 1744-1763.

Karl. T.R., Quinlan, F. y Ezell, D.D., (1987): Drought termination and amelioriation: its climatological probability. *Journal of Climate and Applied Meteorology.* 26: 1198-1209.

Karnieli, A., (1990): Application of kriging technique to areal precipitation mapping in Arizona. *Geojournal* 22: 391-398.

Katz, R.W. y Glantz, M., (1986): Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review.* 114: 764-771.

Kaufman, Y.J. y Holben, B.N., (1993): Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint, and desert reflection. *International Journal of Remote Sensing,* 14: 21-52.

Kaufman, Y.J. y Tanré, D., (1996): Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: from AVHRR to EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 55: 65-79.

Kaufmann, R.K., Zhou, L., Shabanov, N.V., Myneni, R.B.y Tucker, C.J., (2000): Effect of orbital drift and sensor changes on the time series of AVHRR vegetation index data. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing.* 38: 2584-2597.

Kawabata, A., Ichii, K. y Yamaguchi, Y. (2001): Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing.* 22 (7): 1377-1382.

Keating, B.A. y Meinke, H., (1998): Assessing exceptional drought with a cropping systems simulator: a case study for grain production in Northeast Australia. *Agricultural Systems* 57: 315-332.

Kerr, Y.H., Imbernon, J., Dedien, G., Hantecoeur, O., Lagonarde, P. y Seguin, B., (1989): NOAA-AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *International Journal of Remote Sensing,* 10: 847-854.

Keyantash, J. y Dracup., J., (2002): The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83: 1167-1180.

Knipling, E.B., (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment,* 1: 155-159.

Kogan, F.N., (1990): Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing.* 11: 1405-1420.

Kogan, F., (1995): Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 76: 655-668.

Kogan, F.N., (1997): Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 78: 621-636.

Kogan, F., (1998): A typical pattern of vegetation conditions in southern Africa during El Niño years detected from AVHRR data using three-channel nummerical index. *International Journal of Remote Sensing.* 19: 3689-3695.

Kogan, F.N., (2000): Satellite-observed sensitivity of world land ecosystems to El Niño/La Niña. *Remote Sensing of Environment.* 74: 445-462.

Kogan, F.N, (2000b): Contribution of remote sensing to drought early warning. En *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management.* WMO. Lisboa. 86-100.

Kogan, F.N., (2001): Operational space technology for global vegetation assessment. *Remote Sensing of Environment*. 82: 1949-1964.

Kogan, F. y Sullivan, J., (1993): Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research.* 5: 219-222.

Kogan, F.N., y X. Zhu. (2001): Evolution of long-term errors in NDVI time series: 1985-1999. *Advances in Space Research.* 28: 149-153

Komuscu, A.U., (1999): Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey. *Drought Network News*: 11: 7-13.

Kozlowski, T.T., Kramer, P.J. y Pallardy, S.G., (1991): *The physiological ecology of woody plants.* Academic Press. San Diego.

Kramer, P.J., (1983): *Water relations of plants.* Academis Press. Nueva York. 489 pp.

Krannich, R.S., Keenan, S.P., Walker, M.S. y Hardesty, D.L., (1995): Social implications of severe sustained drought: case studies in California and Colorado. *Water Resources Bulletin,* 31: 851-865.

Kumar, K.K., Kumar, K.R. y Rakhecha, P.R., (1987): Comparison of Penman and Thornthwaite methods of estimating potential evapotranspiration for Indian conditions. *Theoretical and Applied Climatology.* 38: 140-146.

Kunkel, K.E., Pielke, R.A. y Changnon, S.A., (1999): Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human helath impacts: a review. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 80: 1077-1098.

Lagergren, F. y Lindroth, A., (2002): Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology,* 31: 67-85.

Lampurlanés, J., Angás, P. y Cantero-Martínez, C., (2001): Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crop Research,* 69: 27-40.

Lana, X., Serra, C. y Burgueño, A., (2001): Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the Standardied Precipitation Index for Catalonia (NE Spain). *International Journal of Climatology.* 21: 1669-1691.

Lasanta, T., Perez Rontome, C., Garcia-Ruiz, J.M., Machin, J. y Navas, A., (1995): Hydrological problems resulting from farmland abandonment in semi-arid environments: The Central Ebro Depression. *Physics and Chemistry of the Earth*, 3-4: 309-314.

Laughlin, G. y Clark., A., (2000): Drought science and drought policy in Australia: a risk management perspective. En *Early warning systems for drought preparedness and drought management.* World Meteorological Organization. Lisboa: 32-44.

Lawrimore, J., Heim, R.R., Svoboda, M., Swail, V. y Englehart, P.J., (2002): Beginning a new era of drought monitoring across North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83: 1191-1192.

Leport, L., Turner, N. C.R., French, J., Barr, M.D., Duda, R., Davies, S.L. Tennant D. y Siddique, K.H.M., (1999): Physiological responses of chickpea genotypes to terminal drought in a Mediterranean-type environment. *European Journal of Agronomy*: 11: 279-291.

Lewis, J.E., Rowland, J. y Nodean, A., (1998): Estimating maize production in Kenya using NDVI: Some statistical considerations. *International Journal of Remote Sensing.* 19: 2609-2617.

Le Houerou, H.N., (1984): Rain use efficiency: a nifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments,* 7: 1-12.

Liso, M. y Ascaso, A., (1969): *Introducción al estudio de la evapotranspiración y clasificación climática del valle del Ebro.* Anales de Aula Dei, 10. Zaragoza.

Liu, W.T. y Kogan, F.N., (1996): Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing,* 17: 2761-2782.

Liu, W.T., y Massambini, O., (1994): Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. *International Journal of Climatology.* 14: 343-354.

Lo Seen Chong, D., Mougin, E. y Gastellu-Etchegorry, J.P., (1993): Relating the global vegetation index to net primary productivity and actual evapotranspiration over Africa. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 1517-1546.

López, M.V., Arrúe, J.L. y Sánchez-Girón, V., (1996): A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragon. *Soil and Tillage Research,* 37: 251-271.

López, M.V. y Arrúe, J.L., (1997): Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil & Tillage Research.* 44: 35-54.

López Bermúdez, (1985): *Sequía, aridez y desertificación en Murcia.* Discurso de ingreso en la Academia Alfonso X el Sabio. Murcia. 85 pp.

López Bermúdez, F., (1994): Degradación del suelo: ¿fatalidad climática o mala gestión humana?. Hacia una gestión sostenible del recurso en el contexto mediterráneo. *Papeles de geografía,* 20: 49-64.

López Bermúdez, F., (2000): Impactos regionales del cambio climático. Valoración de la vulnerabilidad. *Papeles de Gegrafía,* 32: 77-96.

López Bermúdez, y Alonso, F., (2001): Aridez y sequías en la cuenca del Segura. En (Gil, A. y Morales, A. Eds.) *Causas y consecuencias de las sequías en España.* CAM, Alicante: 187-206.

López-Moreno, J.I., Hess, T. y White, S., (2003): Estimation of reference evapotranspiration in the upper Aragón River Basin, with Penman-Monteith equation using easily available meteorological data. *Geophysical Research Abstracts* vol 5: 1027.

Los, S.O., (1998): Estimation of the ratio of sensor degradation between NOAA-AVHRR channels 1 and 2 from monthly NDVI composites. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing,* 36: 206-213.

Lotsch, A., Friedl, M.A. y Anderson, B.T., (2003): Coupled vegetation-precipitation variability observed from satellite and climate records. *Geophysical Research Letters,* 30: 8.

Lozano-García, D.F., Fernández, R.N., Gallo, K.P. y Johansen, C.J., (1995): Monitoring the 1988 severe drought in Indiana, USA, using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing.* 16: 1327-1340.

Lucht, W., Prentice, I.C., Myneni, R.B., Sitch, S., Friedlingstein, P., Cramer, W., Bousquet, P., Buermann, W. y Smith., B. (2002): Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science* 296: 1687-1689.

Machín, J. y Navas, A., (1998): Spatial analysis of gypsiferous soils in the Zaragoza province (Spain), using GIS as an aid to conservation, Geoderma. 87: 57-66.

Mainguet, M., (1991): *Desertification, natural background and human mismanagement.* Springer-Verlag, 306 pp.

Malo, A.R. y Nicholson, S.E., (1990): A study of rainfall and vegetation dynamics in the African sahel using Normalized Differenced Vegetation Index. *Journal of Arid Environments,* 19: 1-24.

Manabe, S. y Wetherald, R.T., (1986): Reduction in summer soil wetness induced by an increase in atmospheric CO2. *Science,* 232: 626-628.

MAPA, (2000): *Red Contable Agraria Nacional.* Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación. 198 pp.

Marcos, O., (2001): Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas.* 26: 59-80.

Marín Cantalapiedra, M., (1973): *Movimientos de población y recursos de la provincia de Zaragoza.* CSIC. 377 pp.

Martí, A., (1992): *La agroclimatología de los Monegros: alternativas al uso tradicional del secano.* Instituto de Estudios Altoaragoneses. 320 pp.

Martí, A., (1992b): Repercusiones de la irregularidad pluviométrica en los rendimientos de los cereales de secano en los Monegros. *ITEA,* 88: 9-20.

Martí, A., (1993): Cálculo de adversidades climáticas para los cultivos: los cereales de verano en Monegros. *Geographicalia,* 30: 259-270.

Martínez-Cob, A., (2002): Infraestimación de la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite en climas semiáridos. En *la información climática como herramienta de gestión ambiental.* (J.M. Cuadrat, S.M. Vicente y M.A. Saz). Universidad de Zaragoza: 117-122.

Martínez-Cob, A., Faci, J.M. y Bercero, A., (1998): *Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón*. Institución Fernando el Católico. Zaragoza. 224 pp.

Martínez Gil, J., Cuadrat Prats, J.Mª y Saz Sánchez M.A. (2000): Las sequías en el proyecto del Plan Hidrológico Nacional. *I Congreso Ibérico sobre planificación y gestión del Aguas*, Oporto, Portugal: 271-283

Maseli, F., Conese, C., Petkov, L. y Gilabert, M.A., (1992): Use of NOAA-AVHRR NDVI data for environmental monitoring and crop forecating in the Sahel. Preliminary results. *International Journal of Remote Sensing.* 13: 2743-2749.

Maseli, F., Conese, C., Petkov, L. y Gilabert, M.A., (1993): Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA-NDVI data. A case study: Níger, 1986-89. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 3471-3487.

McAneney, K.J. y Arrúe, J.L., (1993): A wheat-fallow rotation in northeastern Spain: water balance – yield considerations. *Agronomie,* 13: 481-490.

McGregor, M., (1987): Anomalous wet and dry spells in the central United States (1931-1975). *Physical Geography,* 8: 225-240.

McKee, T.B.N., Doesken, J. y Kleist, J., (1993): The relationship of drought frecuency and duration to time scales. *Eight Conf. On Applied Climatology.* Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. 179-184.

McKee, T.B.N., Doesken, J. y Kleist, J., (1995): Drought monitoring with multiple time scales. *Ninth. Conf. On Applied Climatology,* Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 233-236.

McKee, T.B.N., Doesken, J., Kleist, J. y Shrier, C.J., (2002): *A history of drought in Colorado.* Disponible on-line en http://cwrri.colostate.edu. 20 pp. Última visita 6-2-2002.

McVicar, T.R. y Jupp, D.L.B., (1998): The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agricultural Systems,* 57: 399-468.

Mensua, S., (1981): La vegetación de Aragón. En *Geografía de Aragón* (A. Higueras ed.): 144-160.

Milich, L. y Weiss, E., (1997): Characterization of the Sahel: implications of correctly calculating interannual coefficient of variation (CoVs) from GAC NDVI values. *International Journal of Remote Sensing.* 18: 3749-3759.

Milich, L. y Weiss, E., (2000): GAC-NDVI images: relationship to rainfall and potential evaporation in the grazing lands of the Gourma (northern Sahel) and in the croplands of the Niger-Nigeria border (southern Sahel). *International Journal of Remote Sensing.* 21: 261-280.

Millington, A.C., Wellens, J., Settle, J.J. y Saull, R.J., (1994): Explaining and monitoring land cover dynamics in drylands using multi-temporal analysis of NOAA-AVHRR imagery. En (Foody G.H. y Curran, P.J. Eds.) *Environmental remote sensing from regional to global scales.* Jhon Wiley & Sons: 16-43.

Mitasova, H. y Mitas, L., (1993): Interpolation by Regularized Spline with Tension. *Mathematical Geology.* 25: 641-655.

Moleele, N., Ringrose, S., Aruberg, W., Lunden, B. y Vanderpost, C., (2001): Assessment of vegetation indexes useful for browse (forage) prediction in semiarid rangelands. *International Journal of Remote Sensing.* 22: 741-756.

Molineaux, B., Royer, A. y O'Neill, N., (1998): Retrieval of Pinatubo aerosol optical depth and surface bidirectional reflectance from six years of AVHRR global vegetation index data over boreal forests. *Journal of Geophysical Research,* 103: 1847-1856.

Molinero, F., (2001): Consecuencias agrarias de las sequías en Castilla y León. En *Causas y consecuencias de las sequías en España.* (A. Gil Olcina y A. Morales Gil Eds.): 261-276.

Monnik, K., (2000): Role of drought early warning systems in South Africa´s evolving drought policy. En *Early warning systems for drought preparedness and drought management.* World Meteorological Organization. Lisboa: 53-64.

Montañés, L., Sanz, M. y Heras, L., (1991): *Fertilidad de los suelos de secano en la provincia de Zaragoza.* DGA, Serie de Estudios Agrarios. Zaragoza, 233 pp.

Morales, A. y Rico, A., (1996). Sequías en el sureste de la Península Ibérica: cambios en la percepción de un fenómeno natural. *Investigaciones Geográficas,* 15: 127-143.

Morales, A., Olcina, J. y Rico, A.M., (2000): Diferentes persepciones de la sequía en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Investigaciones Geográficas,* 23: 5-46.

Motha, R., (2000): Recommendations on drought monitoring by the U.S. national policy commision. En *Early warning systems for drought preparedness and drought management.* World Meteorological Organization. Lisboa: 45-52.

Moulin, S., Bondeau, A. y Delécolle, R., (1998): Combining agricultural crop models and satellite observations from field to regional scales. *International Journal of Remote Sensing.* 19: 1021-1036.

Myneni, R.B., Los, S.O. y Tucker, C.J., (1995): Satellite-based identification of linked vegetation index and sea surface temperature from 1982-1990 for Africa, Australia and South America. *Geophysical Research Letters.* 23: 729-732.

Myneni, R.B., Tucker, C.J., Asrar, G. y Keeling C.D., (1998): Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research,* 103: 6145-6160.

Narasimha Rao, R.V., Venkataratuam, L., Krishna, P.V., Ramana, K.V., (1993): Relation between root zone soil moisture and normalized difference vegetation index of vegetated fields. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 441-449.

Navas, A., (1990): The effect of simulated runoff on the erosion of gypsiferous soils. *Land Degradation and rehabitation,* 2: 117-126.

NDMC (2003): National Drought Mitigation Center. http://www.drought.unl.edu/index.htm

NDMC, (2003b): *National Drought Mitigation Center: Interpretation of SPI maps.* http://www.drought.unl.edu/monitor/interp.htm

New, M., Hulme M., y Jones, P., (2000): Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13: 2217-2238.

Nicholson, S.E., y Farrar, T.J., (1994): The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semi-arid Botswana. I. Relationship to rainfall. *Remote Sensing of Environment* 50: 107-120.

Nicholson, S.E., Davenport, M.L. y Malo, A.R., (1990): A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and east Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA-AVHRR. *Climatic Change,* 17: 209-241.

Nicholson, S.E., Tucker, C.J. y Ba, M.B., (1998): Desertification, drought and surface vegetation: an example from the west African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 79: 815-829.

Ninyerola, M., Pons, X. y Roure, J.M., (2000) A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology* 20: 1823-1841.

Nkemdirim, L. y Weber, L., (1999): Comparison between the droughts of the 1930s and the 1980s in the southern praires of Canada. *Journal of Climate.* 12: 2434-2450.

NOAA. (2003): *NOAA-14 calibration information as of 31 July 1995 Amendments to NOAA Technical Memorandum 107 Appendix-B for NOAA-J/14.* http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/cal14_1.html

NOAA. (2003b): *Climate Prediction Center. Regional Climate Maps: Palmer Index* http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/regional_monitoring/palmer.gif

Obasi, G.O.P., (1994): WMO`s role in the international decade for natural disaster reduction. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 75: 1655-1661.

Oesterheld, M., DiBella, C.M. y Kerdiles, H., (1998): Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological Applications*. 8: 207–212.

Ofori-Sarpong, E., (1985): The nature of rainfall and soil moisture in the northeastern part of Ghana during the 1975-1977 drought. *Geografiska Annaler,* A67: 177-186.

Olano, J.M. y Palmer, M.W., (2003): Stand dynamics of an Appalachian old-growth forest during a severe drought episode. *Forest Ecology and Management,* 174: 139-148.

Olcina, J. y Rico, A., (1995): Sequías y golpes de calor en el sureste ibérico: efectos territoriales y económicos. *Cuadernos de Geografía.* 13: 47-79.

Olesen, J.E., Bøcher P. K., y Jensen, T., (2000): Comparison of scales of climate and soil data for aggregating simulated yields of winter wheat in Denmark, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82: 213-228

Orwing, D.A. y Abrams, M.D., (1997): Variation in radial growth responses to drought among species, site and canopy strata. *Trees,* 11: 474-484.

Palmer, W.C., (1965): *Meteorological droughts.* U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45, 58 pp.

Paltridge, G.W. y Mitchell, R.M., (1990): Atmospheric and viewing angle correction of vegetation indices and grassland fuel moisture content derived from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment,* 31: 121-135.

Paracchini, M.L., Bertolo, F., Folving, S. y Mégier, J., (1998): Remote sensing and GIS for land degradation monitoring. En *Future trends in Remote Sensing* (P. Gudmandsen Ed.). Balkema. Rotterdam: 243-249.

Parry, M.L. y Carter, T.R., (1987): Climate impacts assessment: a review of some approaches. En (D.A. Wilhite y W.E. Easterling Eds.) *Planning for drought: toward a reduction of societal vulnerability.* Westview Press, Colorado. USA.

Paruelo, J.M. y Lauenroth, W.K., (1998): Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography.* 25: 72-733.

Paruelo, J.M., Epstein, H.E., Lauenroth. W.K. y Burke, J.C., (1997): ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the US. *Ecology,* 78: 953-958.

Pastor, A., Nogués, S. y Alegre, L., (1995): Water stress effects on photosynthesis in Mediterranean shrubs: a field study. En *Photosynthesis: from light to biosphere* vol IV. (P. Mathis, ed.). Kluweer: 589-592.

Pèchoux, P.Y., (1977): La grande secheresse de 1973 a chypre. *Revue de Géographie de Lyon,* 1977/2: 197-213.

Pedersen, B.S., (1998): The role of stress in the mortality of midwestern oaks as indicated by growth prior to death. *Ecology,* 79: 79-93.

Pedrocchi, C., (1998): *Ecología de los Monegros*. Instituto de Estudios Altoaragoneses. 430 pp.

Peña, J.L., Pellicer, F., Julián, A., Chueca, J., Echeverría, M.T., Lozano, M.V. y Sánchez, M., (2002): *Mapa geomorfológico de Aragón.* Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. 54 pp + 3 mapas.

Pérez-Cabello, F., (2001): Paisajes forestales y fuego en el Prepirineo occidental oscense : un modelo regional de reconstrucción ambiental Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. 358 pp. Zaragoza

Pérez Cueva, A., (1983): La sequía de 1978-1982, ¿excepcionalidad o inadaptación?. *Agricultura y Sociedad,* 27: 225-245.

Peters, A.J., Rundquist, D.C.y Wilhite, D.A. (1991): Satellite detection of the geographic core of the 1988 Nebraska drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 57: 35-47

Peters, A.J., Walter-Shea, E.A., Viña, A.; Hayes, M. y Svoboda, M.D., (2002): Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 68: 71-75.

Peterson, T.C., Easterling, D.R., Karl, T.R., *et al.,* (1998): Homogeneity adjustments of *in situ* atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology.* 18: 1493-1517.

Peuquet, D.J., (1994): It's about Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. *Annals of the Association of American Geographers*, 83: 441-461.

Phillips, D.L., Dolph, J. y Marks, D., (1992): A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in montainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 58: 119-141.

Pickup, G., (1998): Desertification and climate change – The Australian perspective. *Climate Research,* 11: 51-63.

Pinilla, V., (1995): *Entre la inercia y el cambio. El sector agrario aragonés: 1850-1935.* MAPA. 546 pp. Madrid.

Poccard, I. y Richard, Y., (1996): Sensibilité du NDVI aux variations pluviométriques par suivi satellital en Afrique tropicale. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie,* 9: 41-48.

Pons, X, (1997): Estimación de la radiación solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. En *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.* (J. Juriasti y I. Moro, Eds.). Vitoria-Gasteiz: 87-97.

Pons, X, (1998): *Manual of Miramon. Geographic Information System and Remote Sensing Software.* (http://www.creaf.uab.es/miramon). Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF): Bellaterra.

Potter, C.S. y Brooks, V., (1998): Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing,* 19: 2921-2948.

Price, J.C., (1987): Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. *Remote Sensing of Environment.* 21: 15-27.

Price, J.C. 1991. Timing of NOAA afternoon passes. *International Journal of Remote Sensing.* 12: 193-198.

Prince, S.D. y Tucker, C.J., (1986): Satellite remote sensing of rangelands in Botswana II: NOAA-AVHRR and herbaceous vegetation. *International Journal of Remote Sensing,* 7: 1555-1570.

Prince, S.D., y Justice, C.O., (1991): Coarse resolution remote sensing of the Sahelian environment. *International Journal of Remote Sensing.* 12: 1133-1421.

Prudhomme, C. y Reed, D.W., (1999): Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: a case study in Scotland. *International Journal of Climatology* 19: 1337-1356.

Quarmby, N.A., Milnes, M., Hindle, T.L. y Silleos, N. (1993): The use of multitemporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 199-210.

Quiring, S.M. y Papakryiakou, T.N., (2003): An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian praires. *Agricultural and Forest Meteorology,* 118: 49-62.

Rana, G. y Katerji, N., (2000): Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy,* 13: 125-153.

Rao, C.R.N., y J. Chen. (1994): Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9 and -11 spacecraft, *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1931-1942.

Rao, C.R.N. y Chen, J., (1999): Revised post-launch calibration of the visible and near-infrared channels of the advanced very high resolution radiometer on the NOAA-14 spacecraft. *International Journal of Remote Sensing.* 20: 3485-3491.

Rasmussen, M.S., (1992): Assessment of millet yields and production in Northern Burkina Faso using integrated NDVI from AVHRR. *International Journal of Remote Sensing,* 13: 3431-3442.

Rasmussen, M.S., (1997): Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability. *International Journal of Remote Sensing.* 18: 1059-1077.

Rasmussen, M.S., (1998): Developing simple operational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information: Part I. Assessment of net primary production. *International Journal of Remote Sensing.* 19: 97-117.

Rasmussen, M.S., (1998b): Developing simple, aperational, consistent NDVI-vegetation models by applying environmental and climatic information. Part II: Crop yield assessment. *International Journal of Remote Sensing.* 19: 119-139.

Redmond, K.T., (2002): The depiction of drought. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83: 1143-1147.

Reed, B.C., (1993): Using remote sensing and geographic information systems for analysisng landscape/drought interaction. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 3489-3503.

Richard, Y. y Poccard, I., (1998): A statsitical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in southern Africa. *International Journal of Remote Sensing,* 19: 2907-2920.

Richards, J.A., (1993): *Remote sensing digital analysis: an introduction.* Springer-Verlag. New-York.

Riebsame, W.E., (1988): Adjusting water resources management to climate change. *Climatic Change,* 13: 69-97.

Rindschede, G., (1972): *Die trashumance in den französischen westalpen und in den Pyrenäen.* Tesis doctoral. Munster. 524 pp.

Ringrose, S. y Matheson, W., (1991): A Landsat analysis of range conditions in the Botswana Kalahari drought. *International Journal of Remote Sensing.* 12: 1023-1051.

Roldan, L., Tabuenca, J.M. y Orensanz, J., (2002): Superficies, producciones y precios de los cultivos herbáceos. *Surcos*, 78: 38-43.

Ruiz, E., (1982): La transición climática del Cantábrico Oriental al valle medio del Ebro. *Diputación Foral de Álava.* 651 pp.

Running, S.W. y Nemani, R.R., (1988): Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sensing of Environment.* 24: 347-367.

Sadras, V., Roget, D. y Krause, M., (2003): Dynamic cropping strategies for risk management in dry-land farming systems. *Agricultural Systems.* 76: 929-948.

Salvador, R. y Pons, X. (1996): Analysis of the discrimination of burnt sites temporal evolution in a Mediterranean area. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 4: 159-169.

Samson, S.A., (1993): Two indices to characterize temporal patterns in the spectral response of vegetation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 59: 511-517.

Sánchez-Toribio, M.I., (1992): *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*. Cuadernos Téncicos de la S.E.G., Ed Geoforma. Logroño.

Sannier, C.A.D. y Taylor, J.C., (1998): Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in Southern Africa for wildlife management and food security assessment. *International Journal of Remote Sensing,* 19: 621-639.

Santos, P. y Negrín, A.J., (1997): A comparison of the Normalized Difference Vegetation Index and rainfall for the Amazon and Notheastern Brazil. *Journal of Climate.* 36: 958-965.

Scian, B. y Donnari, M., (1997): Retrospective analysis of the Palmer drought severity index in the semi-arid Pampas region. *International Journal of Climatology.* 17: 313-322.

Schmidt, H. Y Gitelson, A., (2000): temporal and spatial vegetation cover changes in Israel transition zone: AVHRR-based assessment of rainfall impact. *International Journal of Remote Sensing,* 21: 997-1010.

Schultz, P.A. y Halpert, M.S., (1993): Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research,* 13: 277-280.

Schultz, P.A. y Halpert, M.S., (1995): Global analysis of the relationships among a vegetation index. Precipitation and land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing,* 16: 2755-2777.

Schütz, M. y Fangmeier, A., (2001): Growth and yield responses of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Minaret) to elevated CO2 and water limitation. *Environmental Pollution.* 114: 187-194.

Seeger, M., (2001): *Boden und Bodenwasserhaushalt als Indikatoren der Landdegradierung auf extensivierten Nutzflächen in Aragón/Spanien.* Freiburg Inst. f. Phys. Geographie, Albert-Ludwigs-Univ. 184 pp.

Seiler, R.A., Kogan, F. y Wei, G., (2000): Monitoring weather impact and crop yield from NOAA-AVHRR data in Argentina. *Advances in Space Research.* 26: 1177-1185.

Sellers, P.J., (1985): Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing.* 6: 1335-1372.

Serra, P., Pons, X. y Saurí, D., (2003): Post-classification change detection with data from different sensors: some accuracy considerations. *International Journal of Remote Sensing.* 24: 3311-3340.

Serrano, A., García, J.A., Mateos, V.L., Cancillo, M.L. y Garrido, J., (1999): Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian peninsula. *Journal of Climate,* 12: 2894-2919.

Seguin, B., Assad, E., Freteaud, J.P., Imbernou, J., Kerr, Y. y Lagouarde, J.P., (1989): Use meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian region. *International Journal of Remote Sensing,* 10: 1101-1117.

Sharma, T., Sudha, K.S., Ravi, N., Navalgund, R.R., Tomar, K.P., Chakraborty, N.V.K., y Das, D.K., (1993): Procedures for wheat yield prediction from Landsat-MSS and IRS-1A data. *International Journal of Remote Sensing,* 14: 2509-2518.

Sheperd, A., McGinn, S.M. y Wyseure, G.C.L., (2002): Simulation of the effect of water shortage on the yields of winter wheat in North-East England. *Ecological Modelling,* 147: 41-52.

Siddique, K.H.M., Regan, K.L., Temmant, D. y Thomson, B.D., (2001): Water use and water use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments. *European Journal of Agronomy,* 15: 267-280.

Siegel, S. y Castelan, N.J., (1988*): Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. Mc-Graw-Hill, Inc. New York.

Sims, A.P., Nigoyi, D.S. y Raman, S., (2002): Adopting indices for estimating soil moisture: A North Carolina case study. *Geophysical Research Letters,* 29: 1-4.

Singh, S.M. y Saull, R.J., (1988): The effect of atmospheric correction on the interpretation of multitemporal AVHRR derived vegetation index dynamics. *Remote Sensing of Environment.* 25: 37-51.

Slayback, D.A., Pinzon, J.E., Los, S.O. y Tucker, C.J., (2003): Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology,* 9: 1-15.

Smika, D.E., (1970): Summer fallow for dryland winter wheat in the semi-arid Great Plains. *Agronomy Journal,* 62: 15-17.

Srivastava, S.K., Jayaraman, V., Nageswara Rao, P.P., Manikiam, B. y Chandrasekhar, M.G., (1997): Interlinkages of NOAA/AVHRR derived integrated NDVI to seasonal precipitation and transpiration in dryland tropics. *International Journal of Remote Sensing.* 18: 2931-2952.

Stepanek, P., (2003): Homogeneización de las series de temperatura del aire en la República Checa durante el período instrumental. *Geographicalia.* 43: 5-24.

Stowe, L.L., Carey, R.M. y Pelegrino, P.P., (1992): Monitoring the Mt. Pinatubo aerosol layer with NOAA-11 AVHRR data. *Geophysical Research Letters.* 19: 159-162.

Svoboda, M., LeCompte, D., y otros., (2002): The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 83: 1181-1190.

Suárez-Cardona, F., Sainz, H., Santos, T. y Bernáldez, F.G., (1992): *Las estepas ibéricas.* Ministerio de Obras públicas y Transportes. Madrid. 160 pp.

Suzuki, R., Nomaki, T. y Yamasuri, T., (2001): Spatial distribution and its seasonality of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate in Siberia. *International Journal of Climatology.* 21: 1321-1335.

Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D. y Stephens, S., (2002): The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 83: 1181-1190.

Szalai, S., Szinell, C.S. y Zoboki, J., (2000): Drought monitoring in Hungary. En *Early warning systems for drought preparedness and drought management.* World Meteorological Organization. Lisboa: 182-199.

Tanré, D., Deroo, C., Duhant, P. et al., (1990): Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing.* 11: 659-668.

Teiszen, L.L., Reed, B.C., Bliss, N.B., Wyllie, B.K. y Dejong, D.D., (1997): NDVI, C3 and C4 production and distribution in Great Plains grassland land cover classes. *Ecological Applications,* 7: 59-78.

Thiessen, A.H., (1911): Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review* 39: 1082-1084.

Thornthwaite, C.W., (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review.* 38: 55-94.

Townshend, J.R.G., (1984): Agricultural land-cover discrimination using thematic mapper spectral bands. *International Journal of Remote Sensing.* 5: 681-698.

Townshend, J.R.G. y Justice, C.O., (1986): Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing.* 7: 1435-1445.

Townshend, J.R.G., Goff, T.E. y Tucker, C.J., (1985): Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing,* 6: 888-895.

Tucker, C.J., (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment,* 8: 127-150.

Tucker, C.J. y Sellers., (1986): Satellite Remote Sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing,* 7: 1395-1416.

Tucker, C.J. y Choudhury, B.J., (1987): Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment,* 23: 243-251.

Tucker, C.J., Holben, B.N., Elgin, J.H. y McMurtrey, J.E., (1981): Remote Sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment.* 11: 171-189.

Tucker, C.J., Vanpraet, C., Boerwinkel, E. y Gaton, A., (1983): Satellite remote sensing of total dry matter accummulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment.* 11: 171-189.

Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Boerwinkel, E. y Gaston, A., (1983b): Satellite remote sensing of total dry accumulation in the Senegalese sahel. *Remote Sensing of Environment.* 13: 461-474.

Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J., y Van Ittersum, G., (1985): Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing of Environment,* 17: 233-249.

Tucker, C.J., Newcomb, W.W., Los, S.O. y Prince, S.D., (1991): Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel. 1981-1989, *International Journal of Remote Sensing.* 16: 1133-1135.

Tucker, C.J., Dregner, H.E. y Newcomb, WW., (1991b): Expansion and contraction of the Sahara desert from 1980 to 1990. *Science,* 253: 299-301

UNESCO, (1979): *Map of the world distribution of arid regions.* UNESCO, París, 54 pp.

Unganai, L.S. y Kogan, F.N., (1998): Southern Africa's recent droughts from space. *Advances in Space Research,* 21: 507-511.

Van Dijk, A., Callis, S.L., Sakamoto, C.M. y Decker, W.L., (1987): Smoothing vegetation index profiles: an alternative method for reducing radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 53: 1059-1067.

Van Oosterom, E.J., Ceccareli, S., Peacock, J.M. (1993): Yield response of barley to rainfall and temperature in Mediterranean environments. *Journal of Agricultural Science,* 121: 307-313.

Van Rooy, M.P., (1965): A rainfall anaomaly index independent of time and space. *Notos.* 14: 43-48.

Varvel, G.E., (1994): Monoculture and rotation systems effects on precipitation use efficiency of corn. *Agronomy Journal,* 86: 204-208.

Vázquez, A., Cuevas, J.M., González-Alonso, F., Calle, A. y Casanova, J.L., (2000): Drought monitoring of spanish forests using Landsat-TM satellite images. En *remote Sensing in the 21st century: economic and environmental applications.* (Casanova, J.L. Ed.). Balkema. Rotterdam. 37-39.

Vázquez, A., González-Alonso, F., Calle, A., Cuevas, J.M. y Casanova J.L., (2001): Producción asegurada de cereales y anomalías en el índice de vegetación en España peninsular: 1995-1998. Pages 37-40 *in* Rosell, J.I. and Martínez-Casasnovas J.A. (eds.) *Teledetección, medioambiente y cambio global.* Universidad de Lleida. Lleida.

Vermote, E.F. y Kaufman, Y.J., (1995): Absolute calibration of visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. *International Journal of Remote Sensing.* 16: 2317-2340.

Vicente-Serrano (2004): Evolución espacio-temporal de las sequías en el sector central del valle del Ebro: causas y consecuencias ambientales. *Universidad de Zaragoza.* 1258 pp.

Vicente-Serrano, S.M. y Cuadrat, J.M., (2002): Desarrollo de un método analítico para la obtención del SPI (*Standardized Precipitation Index*) como herramienta para el seguimiento y prevención de sequías climáticas. En *La información climática como herramienta de gestión ambiental* (Cuadrat, J.M, Vicente, S.M. y Saz, M.A Eds.): 145-153. Zaragoza.

Vicente-Serrano, S.M., Saz, M.A. y Cuadrat, J.M., (2003): Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research,* 24 (2): 161-180.

Vicente-Serrano, S.M., Pons, X. y Cuadrat, J.M., (2003b): Mapping soil moisture in the central Ebro river valley (NE Spain) with Landsat and NOAA satellite imagery: a comparison with meteorological data. *International Journal of Remote Sensing.* 25: 4325-4350

Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T. y Romo, A., (2004): Analysis of the spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish central Pyrenees: the role of human management. *Environmental Management.* 34: 802-818

Vicente-Serrano, S.M. (2005): Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management. In press.*

Vilagrosa, A., (2002): *Estrategias de resistencia al déficit hídrico en Pistacia lentiscus L. y Quercus coccifera L.* Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

Wade, G., Mueller, R., Cook, P. y Doraiswanny, P., (1994): AVHRR map products for crop condition assessment: A Geographic Information System Approach. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 60: 1145-1150.

Walsh, S.J., (1987): Comparison of NOAA-AVHRR data to meteorological drought indices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.* 53: 1069-1074.

Walsh, S.J., Crawford, T.W., Welsh, W.F. y Crews-Meyer, K.A., (2001): A multiscale analysis of LULC and NDVI variation in Nang Rong district, northeast Thailand, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85: 47-64.

Wang, J., Price, K.P. y Rich, P.M., (2001): Spatial patterns of NDVI response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing.* 22: 3827-3844.

Wang, J., Rich, P.M. y Price, K.P., (2003): Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing.* 24: 2345-2364.

Wannebo, A. y Rosenzweig, C., (2003): Remote sensing of US cornbelt areas sensitive to the El Niño-Southern Oscillation. *International Journal of Remote Sensing.* 24: 2055-2067.

Washington-Allen, R.A., Ramcey, R.D., Norton, B.E. y West, (1998): Change detection of the effect of severe drought on subsistence agropastoral communities on the Bolivian Altiplano. *International Journal of Remote Sensing.* 19: 1319-1333.

Wassenaar, T., Lagacherie, P., Legros, J.P., Rounsevell, M.D.A., (1999): Modelling wheat yield responses to soil and climate variability at the regional scale. *Climate Research,* 11: 209-220.

Weber, L. y Nkemdirim, L.C., (1998): The Palmer drought severity index revisited. *Geografiska Annaler,* 80A: 153-172.

Weiss, E. y Milich, L., (1997): Errors in a standard method for generating interannual NDVI coefficient of variation (CoV) images. *International Journal of Remote Sensing,* 18: 3743-3748.

White, D., Collins, D. y Howden, M., (1993): Drought in Australia: prediction, monitoring, management and policy. En (D.A. Wilhite ed.) *Drought assessment, management and planning: theory and case studies.* Kluwer. Oston.

Wilhite, D.A., (1983): Government response to drought in the United States: with particular reference to the Great Plains. *Journal of Climate and Applied Meteorology.* 22: 40-50.

Wilhite, D.A., (1986): Drought policy in the U.S. and Australia: A comparative analysis. *Water Resources Bulletin.* 22: 425-438.

Wilhite, D.A., (1991): Drought planning: A process for state government. *Water Resources Bulletin* 27:29–38.

Wilhite, D.A., (1993): *Drought assessment, management and planning: Theory and case studies.* Kluwer. Boston.

Wilhite, D.A., (1997): A methodology for drought preparedness. *Natural Hazards.* 13: 229-252.

Wilhite, D.A., (2000): Drought as a natural hazard: concepts and definitions. En *Drought: a global assessment.* (D. Wilhite ed.). Vol 1: 3-18.

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

Wilhite, D.A., Rosenberg, N.J. y Glantz, M.H., (1986): Improving federal response to drought. *Journal of Climate and Applied Meteorology.* 25: 332-342.

Wilhite, D.A. y Svoboda, M.D., (2000): Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. En *Early warning systems for drought preparedness and drought management.* World Meteorological Organization. Lisboa: 1-21.

Willmott C.J. y Robeson, S.M., (1995): Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature. *International Journal of Climatology* 15: 221-229.

Willmott, C.J., Rowe, C.M. y Philpot, W.D., (1985): Small-scale climate maps: a sensitivity analysis of some common assumptions associated with grid-point interpolation and contouring. *The American Cartographer* 12: 5-16.

WMO, World Meteorological Organization, (1975): Drought and agriculture. *WMO technical note* 138, 127 pp.

WMO, World Meteorological Organization, (2000): *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management.* Lisboa.

WRCC, (2002): *Standardized Precipitation Index.* Disponible on-line en http://www.wrcc.dri.edu/spi.html.

Wylie, B.K., Harrington, J.A., Prince, S.D. y Denda, I., (1991): Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger; 1986-1988. *International Journal of Remote Sensing,* 12: 1281-1300.

Wylie, B.K., Meyer, D.J., Tieszen, L.L. y Mannel, S., (2002): Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the north american grasslands. A case study. *Remote Sensing of Environment.* 79: 266-278.

Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A. y Hu, Q., (2001): An evaluation of the standardized precipitation index, the china-z index and the statistical z-score. *International Journal of Climatology,* 21: 745-758.

Yamoah, C.F., Walters, D.T., Shapiro, C.A., Francis, C.A., Hayes, M.J., (2000): Standardized Precipitation Index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 80: 113-120.

Yang, W., Yang, L. Y Merchant, J.W., (1997): An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebrasca, USA. *International Journal of Remote Sensing.* 18: 2161-2180.

Yang, L., Wylie, B.K., Tieszen, L.L. y Reed, B.C., (1998): An analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U.S. northern and central Great Plains, *Remote Sensing of Environment* 65: 25-37.

Yin, Z., (1993): Spatial pattern of temporal trends in moisture conditions in the southeastern United States. *Geografiska Annaler,* 75A: 1-11.

Yu, F., Price, K.P., Ellis, J. y Shi, P., (2003): Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment.* 87: 42-54.

Zierl, B., (2001): A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology,* 242: 115-136.

CESA

CONSEJO ECONÓMICO
Y SOCIAL DE ARAGÓN