

## CIRCULACION ATMÓSFERICA Y VARIABILIDAD VEGETAL EN SIBERIA CENTRAL (1982-2001)

S. M. VICENTE-SERRANO<sup>(2)</sup>, M. GRIPPA<sup>(1)</sup>,  
N. DELBART<sup>(3)</sup>, T. LE TOAN<sup>(1)</sup> y L. KERGOAT<sup>(1)</sup>

(1) Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO),  
18 avenue. Edouard Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse cedex 9, France

(2) Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC (Spanish Research Council),  
Campus de Aula Dei, P.O. Box 202, Zaragoza 50080, Spain

(3) Ecosystem Change Research Group, JAMSTEC Frontier Research Center for Global Change,  
3173-25 Showa machi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, 236-0001, Japan

Correo electrónico de contacto: svicent@ipe.csic.es

**RESUMEN.** *En este trabajo se analiza la distribución espacial de la actividad vegetal en Siberia central y su relación con la variabilidad en la circulación atmosférica. Para ello se han utilizado imágenes NOAA-AVHRR a partir de la base de datos Pathfinder a una resolución espacial de 1 grado. A partir de esta base de datos se calculó la actividad vegetal anual en cada píxel (aNDVI) entre 1982 y 2001. Se realizó un Análisis de Componentes Principales para determinar los principales patrones espaciales en la variabilidad interanual de la actividad vegetal. Los tres principales modos explican más del 50% de la varianza total, y cada uno corresponde a una amplia región. Mediante valores de presión atmosférica se analizó la circulación atmosférica en esta región y se investigó el papel de la estacionalidad en los patrones de circulación sobre la actividad vegetal. En general, se ha comprobado que la principal relación entre la variabilidad en la circulación atmosférica, las condiciones climáticas y la variabilidad del aNDVI se localiza en aquellas áreas con condiciones climáticas más limitantes para el desarrollo de la vegetación, como es el caso de las regiones de tundra del norte. Esto puede explicarse por el importante papel de la circulación atmosférica sobre las temperaturas estivales, que tienen un peso directo sobre el desarrollo de la vegetación.*

**ABSTRACT.** *This paper analyses the spatial distribution of the inter-annual variability of vegetation activity in central Siberia and its relationship with atmospheric circulation variability. We used NOAA-AVHRR NDVI series from Pathfinder Land Data Set at 1 degree of spatial resolution, and we calculated the*

*annual vegetation activity in each pixel (aNDVI) from 1982 to 2001. Principal Component Analysis was used to determine the general spatial patterns of inter-annual variability of vegetation activity. We identified three main modes, which explain more than 50 % of total variance, each corresponding to a large region. By means of surface pressure grids we analysed the main patterns of the seasonal atmospheric circulation in the study area. We investigated the effect of seasonal atmospheric circulation patterns on the inter-annual variation of vegetation activity. In general, the strongest relationships between the atmospheric circulation variability, climate and the aNDVI variability were found in areas where the climatic characteristics are more limiting for the vegetation development, such as the northern regions. This may be explained by the fact that in these areas the variability of atmospheric circulation modes determines summer temperatures, which have a direct impact on vegetation activity.*

**Palabras clave:** NDVI, Circulación atmosférica, actividad vegetal, análisis de componente principales, relaciones clima-vegetación, Siberia.

**Key words:** Vegetation activity, NDVI, Atmospheric Circulation, Principal Component Analysis, Climate-vegetation relationships, Siberia.

Enviado el 20 de enero de 2006

Aceptado el 22 de mayo de 2006

## 1. Introducción

El clima limita, de forma muy importante, la actividad vegetal y su variabilidad temporal (Schultz y Halpert, 1993; Nemani *et al.*, 2003). Por ello, actualmente se plantean múltiples interrogantes sobre las posibles consecuencias del cambio climático en la distribución espacial de la vegetación y en su variabilidad temporal.

Los efectos del cambio climático ya han sido observados en algunas amplias áreas del hemisferio norte, siendo evidente un aumento en la actividad vegetal (Slayback *et al.*, 2003; Lucht *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2003) y un más temprano inicio de las fases fenológicas (Myneni *et al.*, 1998).

Diferentes estudios han mostrado la influencia de la precipitación, temperatura, así como de la cubierta de nieve sobre la dinámica vegetal en el Hemisferio Norte (Nemani *et al.*, 2003; Dye y Tucker, 2003). Sin embargo, existen pocos análisis que consideren la influencia de la circulación atmosférica sobre la dinámica vegetal (Gong y Ho, 2003; Buermann *et al.*, 2003). Estudios de este tipo pueden ser importantes para entender mejor los posibles efectos del cambio climático sobre los ecosistemas.

La mayor parte de este tipo de análisis se han centrado en el impacto de El Niño-Southern Oscillation (ENSO) (Kogan, 2000; Salinas-Zavala *et al.*, 2002; Eastman y Fulk, 1993). Kogan y Wei (2000) analizaron la respuesta de la vegetación global al fenómeno ENSO y mostraron que este modo de circulación afecta principalmente las

áreas tropicales y algunas regiones del Hemisferio Sur. Sin embargo, Buerman *et al.* (2003) y Vicente-Serrano *et al.* (2006) también han identificado una importante influencia del fenómeno ENSO en algunas regiones boreales.

En el Hemisferio Norte, aunque el fenómeno ENSO influye sobre la circulación atmosférica, la precipitación y la temperatura (Fraedrich, 1994; Ropelewski y Halpert, 1987), existen otros modos de circulación que determinan la variabilidad climática (Hurrell y van Loon, 1997; Thompson *et al.*, 2002). Estos modos son resumidos mediante diferentes índices de teleconexión (Wallace y Gutzler, 1981).

Aunque la influencia de los principales patrones de circulación atmosférica sobre las precipitaciones y temperaturas en el Hemisferio Norte ha sido explicada en numerosos trabajos, existe un menor número de estudios que analicen la influencia de la circulación atmosférica sobre la variabilidad en la actividad vegetal (Vicente-Serrano y Heredia, 2004; Wang, 2003; Wang y You, 2004; Gong y Ho, 2003; Vicente-Serrano *et al.*, 2006). En este sentido, Gong y Shi (2003) indicaron que el 57.2% de la variabilidad temporal de la cubierta vegetal en el Hemisferio Norte se explica por la variabilidad en la circulación atmosférica, y que las tendencias encontradas en dicha actividad vegetal pueden explicarse por tendencias en los principales modos de circulación atmosférica.

Los estudios en las altas latitudes del Hemisferio Norte son escasos, lo que contrasta con su importancia, ya que se trata de regiones muy sensibles a la ocurrencia de cambios en las condiciones climáticas, como consecuencia de sus limitantes condiciones (Brovkin *et al.*, 2003; Esper y Schweingruber, 2004). Además, estas regiones constituyen importantes reservas de carbono (Baldocchi *et al.*, 2000; Bird *et al.*, 2002), lo que refuerza la necesidad de comprender como la variabilidad atmosférica afecta a la dinámica vegetal de estas áreas.

## 2. Área de estudio

El estudio se ha realizado en las regiones de Siberia central (longitud entre 55°E y 115°E y latitud entre 50°N y 80°N, Fig. 1). El clima de esta región es extremadamente continental. Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 0°C del Suroeste (-20°C en enero y 22°C en julio) y los -20°C de las áreas más septentrionales (-40°C en enero y 5°C en julio). La precipitación media anual es más alta en el oeste (600 mm) y, en general, decrece hacia el este, con mínimos valores en el noreste (200 mm) (Wang y Cho, 1997). La variabilidad climática interanual en esta región resulta muy importante (Wang y Cho, 1997; Ye, 2001). Además, la cubierta y el espesor de nieve están muy afectados por la variabilidad de la circulación atmosférica y de las masas oceánicas (Clark *et al.*, 1999; Ye, 2000).

La Fig. 1 muestra la distribución espacial de las principales cubiertas del suelo (De Fries *et al.*, 1998). Existe una clara organización espacial en varias bandas latitudinales como consecuencia de las características climáticas (Suzuki *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2004). Las zonas esteparias y los cultivos son dominantes en las áreas del Suroeste. En

latitudes entre 55°N y 67°N se suceden diferentes bandas de bosques, cuyas características dependen de las condiciones climáticas (Zhang *et al.*, 2004). Al norte se localiza la tundra, donde la vegetación, compuesta principalmente por musgos, líquenes y herbáceas, únicamente está activa en verano, cuando ha desaparecido la cubierta de nieve.

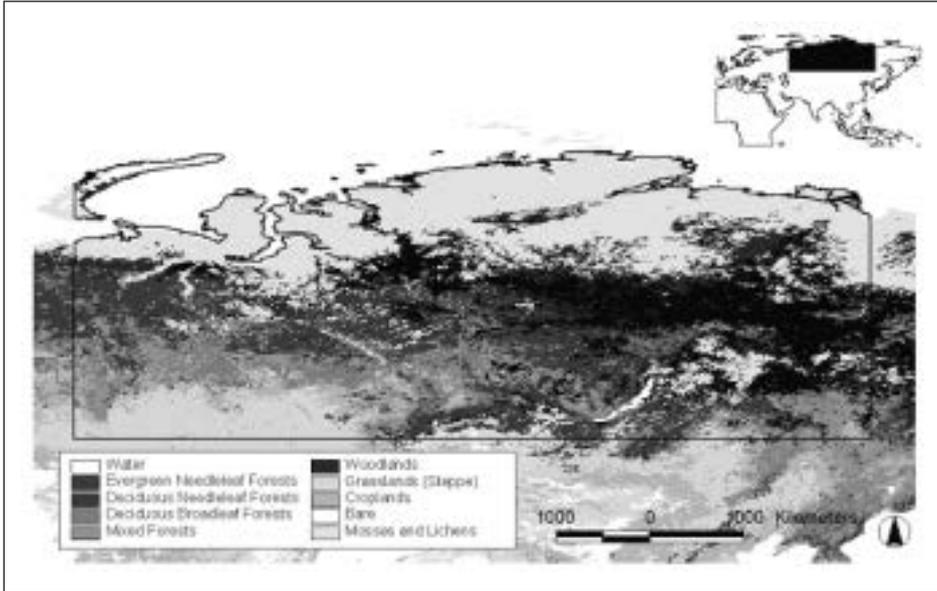


Figura 1. Localización del área de estudio y mapa de cubiertas del suelo

### 3. Metodología

#### 3.1. Determinación de la variabilidad interanual de la vegetación por medio de imágenes de satélite

Las imágenes de satélite se han utilizado frecuentemente para el análisis de la actividad vegetal por medio de índices de vegetación (Kogan, 2001). El índice más utilizado es el índice de vegetación normalizado (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) (Tucker, 1979), que se calcula mediante niveles digitales, radiancias o reflectancias en las regiones espectrales del infrarrojo cercano y el rojo:  $NDVI = (\text{infrarrojo} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo} + \text{rojo})$ .

Existen diferentes bases de datos globales de NDVI creadas a partir de datos AVHRR (PAL y GIMMS NDVI) (Justice y Townshend, 1994, James y Kalluri, 1994). La base de datos PAL-NDVI (<http://daac.gsfc.nasa.gov>) dispone de datos de NDVI cada 10 días entre 1981 y 2001. Detalles sobre esta base de datos y su calidad pueden ser con-

sultados en Smith *et al.*, (1997), Kaufmann *et al.*, (2000) o en Shabanov *et al.*, (2002). En este trabajo se han utilizado los datos PAL-NDVI a una resolución espacial de 1°. A partir de esta base de datos se calculó la actividad vegetal correspondiente a cada año mediante la adaptación del método planteado por Zhang *et al.*, (2003) para determinar la fenología vegetal mediante datos MODIS. Los detalles de este procedimiento se pueden consultar en Vicente-Serrano *et al.*, (2006b). De este modo, para cada año se obtuvo un valor único (aNDVI), y para cada píxel de 1° se pudo disponer de una serie anual de 20 años que representa la variabilidad interanual de la actividad vegetal.

Para resumir esta información y detectar los principales modos espaciales en la evolución vegetal se utilizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), donde las variables a ser resumidas fueron las series de aNDVI en cada píxel de 1°. Previamente, las series originales de aNDVI se estandarizaron para evitar las diferencias espaciales causadas por factores ambientales, el tipo de vegetación y la cantidad de cubierta vegetal. Finalmente, los componentes fueron rotados para redistribuir la varianza final explicada y obtener una más clara separación de los componentes, manteniendo su ortogonalidad (Hair *et al.*, 1998).

### 3.2. Análisis de los patrones estacionales de circulación atmosférica en Siberia mediante el uso de datos de presión en superficie

Para el análisis de la circulación atmosférica se utilizó una retícula de presiones a nivel del mar a una resolución espacial de 5° entre 1982 y 2001, obtenida de NCEP-NCAR (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds010.1/>) (Trenberth y Paulino, 1980; Basnett y Parker, 1997). A partir de esta base de datos se aplicó un nuevo ACP, en modo T, para obtener los principales patrones de circulación en Rusia, siguiendo un esquema similar al indicado por Barnston y Livezey (1987) cuando identificaron las principales teleconexiones atmosféricas en el Hemisferio Norte. El análisis se realizó con las series estacionales de presión, previamente estandarizadas, ya que en el área de estudio las condiciones climáticas presentan una marcada estacionalidad (Fukutomi *et al.*, 2003) y los patrones atmosféricos que las controlan difieren de forma muy significativa entre las diferentes estaciones del año (Aizen *et al.*, 2001; Ye, 2001 y 2002). Por ello, se adoptó una escala estacional, separando el invierno (diciembre, enero y febrero), la primavera (marzo, abril y mayo) y el verano (junio, julio y agosto). No se tuvo en cuenta el otoño porque en las regiones más septentrionales los ciclos de la vegetación finalizan muy pronto y durante la mayor parte de la estación otoñal la vegetación no se encuentra activa.

### 3.3. Análisis de la relación entre los patrones estacionales de circulación atmosférica y la variabilidad interanual de la cubierta vegetal

Para determinar la influencia de la circulación atmosférica sobre las diferencias espacio-temporales del aNDVI se utilizó una aproximación similar a la llevada a cabo por Gong y Shi (2003) cuando analizaron la influencia de los patrones de teleconexión atmosférica sobre el NDVI primaveral en el hemisferio norte. Para ello, las series de cargas factoriales

obtenidas de los patrones de circulación atmosférica fueron utilizadas para crear modelos empíricos siguiendo un análisis de regresión múltiple por pasos (Hair *et al.*, 1998). El método no considera el conocimiento previo de las relaciones clima-vegetación y únicamente utiliza la relación estadística entre variables. La selección de los patrones de circulación atmosférica para ser incluidos en los modelos se basó en correlaciones entre las cargas factoriales de los patrones de circulación (variables independientes) y los componentes principales obtenidos de las series de aNDVI (variable dependiente). La influencia y el signo de cada patrón de circulación atmosférica sobre los modos de actividad vegetal se determinó mediante los coeficientes estandarizados beta obtenidos del análisis de regresión.

Para explicar físicamente la influencia de los modos estacionales de circulación atmosférica sobre la variabilidad espacial y temporal del aNDVI, se analizó la influencia de los patrones de circulación incluidos en los modelos sobre la variabilidad estacional de precipitaciones y temperaturas. Para ello se utilizó la base de datos mensual creada por la *Climate Research Unit* de la *University of East Anglia*, con registros de precipitaciones y temperaturas a 1° de resolución espacial ([http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU\\_TS\\_2\\_0.html](http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_2_0.html), Mitchell *et al.*, 2003).

## 4. Resultados

### 4.1. Variabilidad espacio-temporal de la actividad vegetal anual en Siberia central

La Fig. 2 muestra los 11 componentes rotados obtenidos de las series de aNDVI. La Fig. 3 muestra sus patrones espaciales. El primer componente representa la evolución en las áreas surorientales, el segundo individualiza una amplia área en la región centro-occidental y el tercero se localiza en las áreas más septentrionales. Los otros componentes representan áreas más pequeñas. Los tres primeros componentes explican el 48.5% de la varianza total y se retuvieron para los análisis posteriores. El resto de componentes se descartaron debido a su carácter más local.

### 4.2. Patrones estacionales de circulación atmosférica en superficie en Siberia central

La tabla 1 muestra los resultados del ACP aplicado a los datos de presión en superficie entre 1981 y 2001, así como el número de patrones obtenidos en cada estación del año. En invierno se obtuvieron 6 patrones de circulación, que explican el 84.4% de la variabilidad total. En primavera y en verano se obtuvieron 7 patrones (82.9 % y 79.8 % de la varianza, respectivamente). La Fig. 4 muestra los más importantes patrones de circulación atmosférica obtenidos durante el verano. El modo de circulación 1 indica altas presiones en la región ártica y bajas presiones en el Sur, con importantes gradientes espaciales en los valores de presión. El resto de configuraciones atmosféricas muestran una mayor complejidad espacial con diferentes disposiciones en los centros de altas y bajas presiones. La distribución espacial de los patrones de primavera e invierno muestra también una importante variabilidad espacial. La configuración espacial de dichos patrones puede consultarse en Vicente-Serrano *et al.* (2006b).

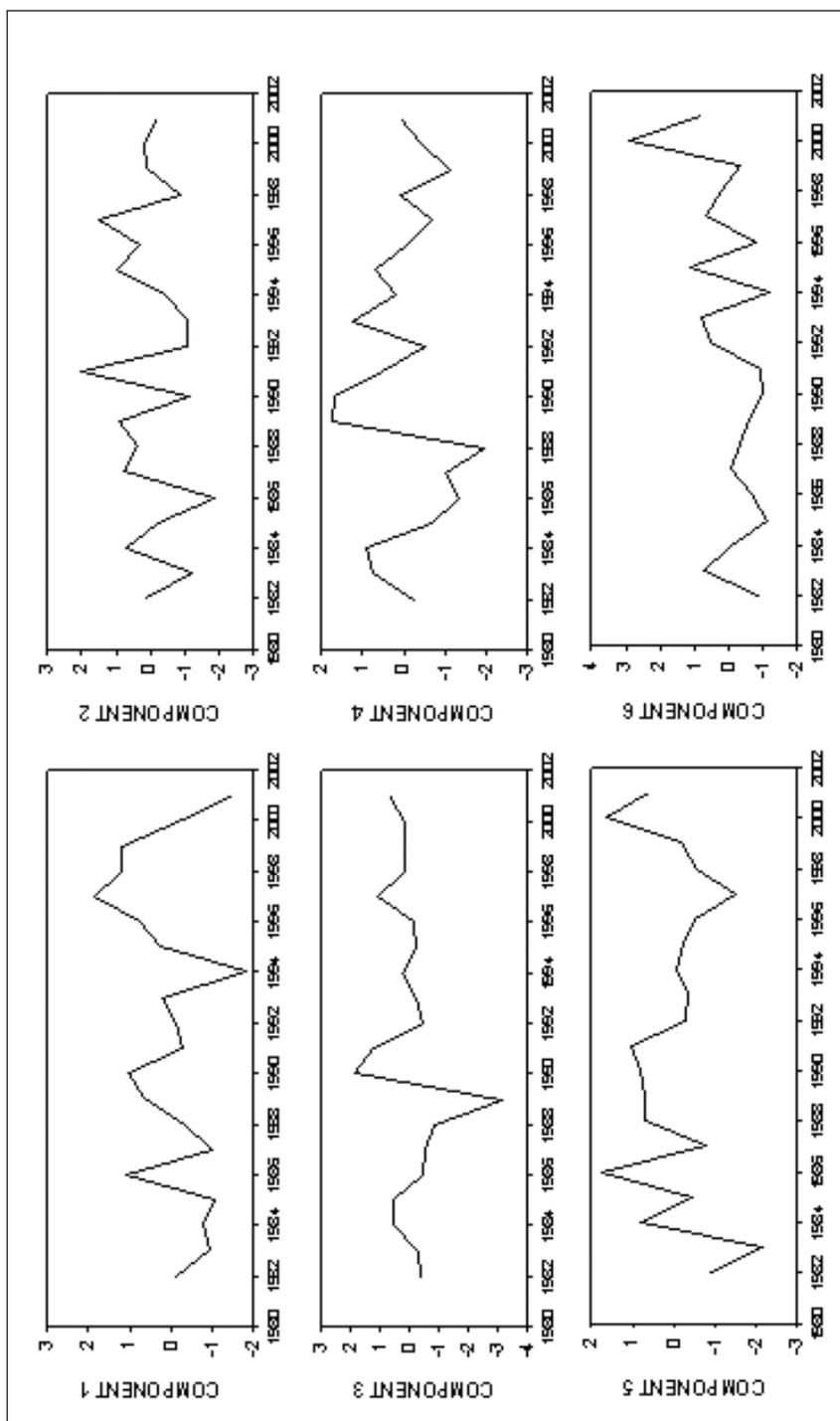


Figura 2. Evolución temporal de los componentes rotados

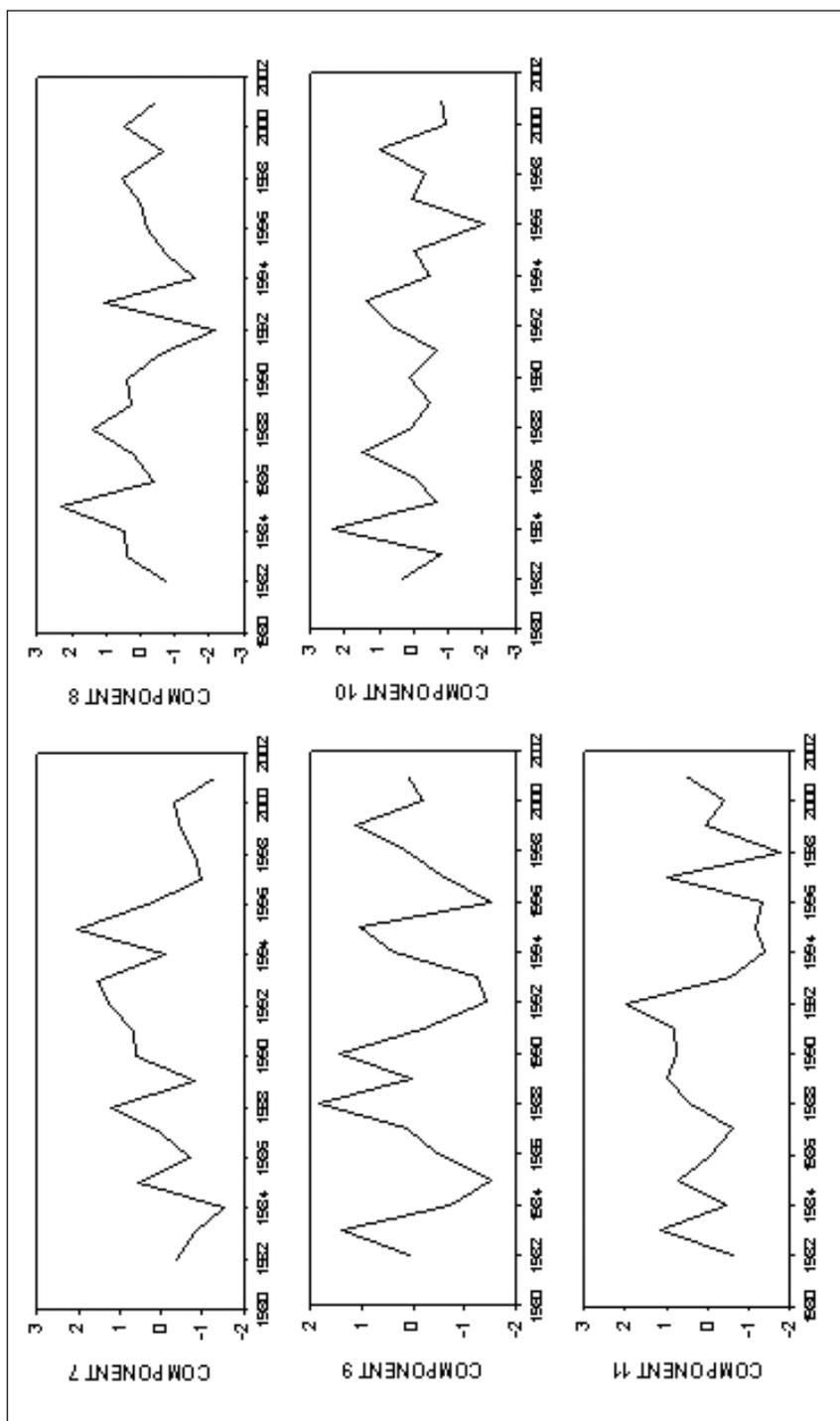


Figura 2. Evolución temporal de los componentes rotados (continuación)

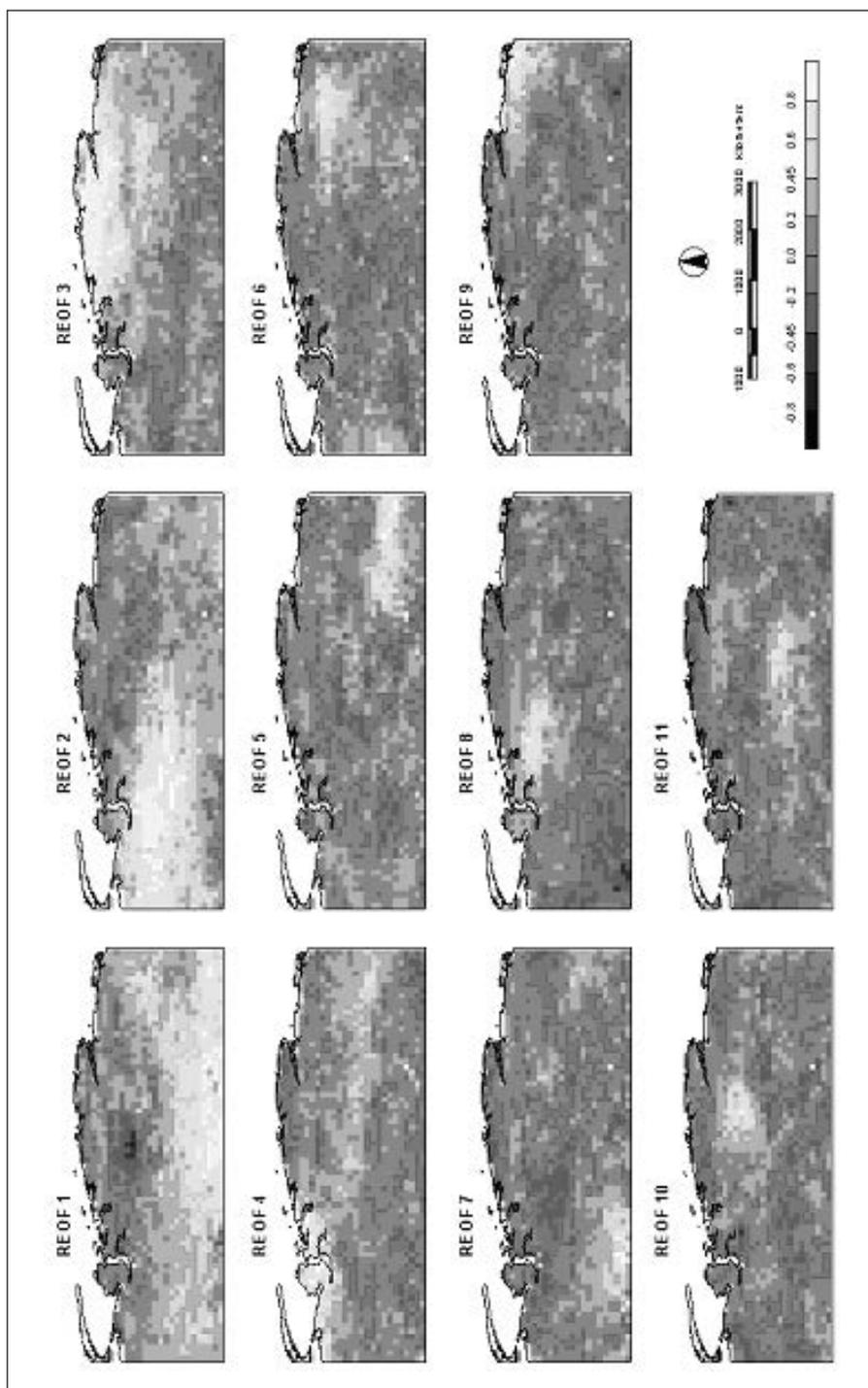


Figura 3. Distribución espacial de las cargas factoriales de los 11 componentes rotados obtenidos

Tabla 1. Patrones de circulación atmosférica obtenidos mediante aplicación de ACP

	<b>Invierno</b>	
<b>Componente</b>	<b>% Varianza</b>	<b>% acumulada</b>
1	21.4	21.4
2	15.0	36.3
3	14.5	50.8
4	12.4	63.2
5	11.1	74.4
6	10.1	84.4
	<b>Primavera</b>	
<b>Componente</b>	<b>% Varianza</b>	<b>% acumulada</b>
1	20.2	20.2
2	15.3	35.4
3	11.8	47.2
4	10.3	57.5
5	9.8	67.2
6	8.5	75.7
7	7.2	82.9
	<b>Verano</b>	
<b>Componente</b>	<b>% Varianza</b>	<b>% acumulada</b>
1	18.2	18.2
2	11.8	30.0
3	11.8	41.9
4	10.3	52.2
5	9.5	61.7
6	9.4	71.1
7	8.7	79.8

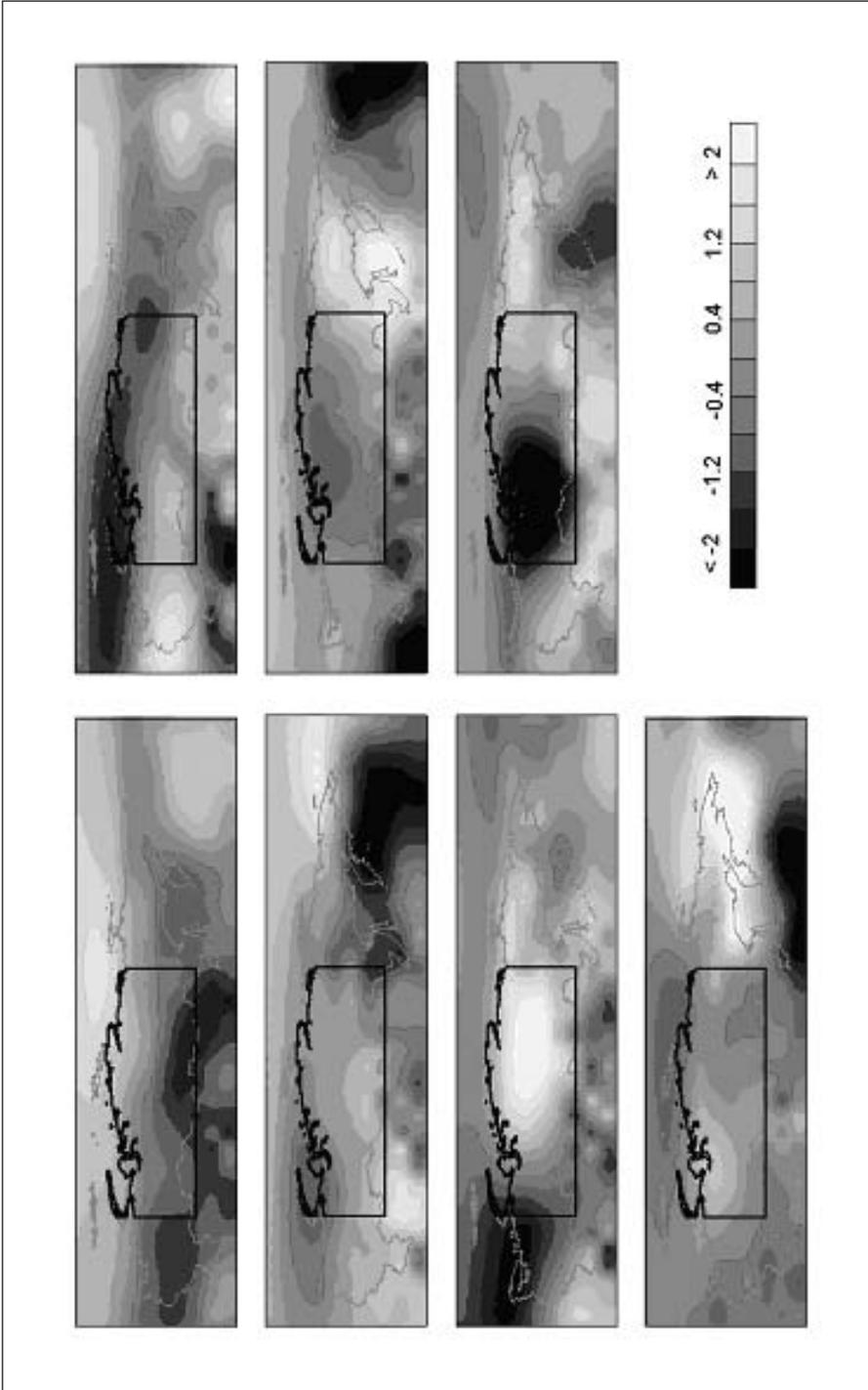


Figura 4. Principales modos de circulación atmosférica obtenidos durante el verano (1982-2001)

#### 4.3. Influencia de los patrones estacionales de circulación atmosférica sobre la variabilidad interanual del aNDVI en Siberia central

La tabla 2 indica los resultados de los modelos empíricos creados para explicar la variabilidad interanual del aNDVI mediante los modos estacionales de circulación atmosférica en las áreas representadas por los tres principales componentes. En la tabla se incluyen las variables de cada modelo, los coeficientes beta estandarizados y las correlaciones parciales. En el caso del componente 1, solamente el 24% de la varianza total del aNDVI es explicada mediante los patrones de circulación atmosférica. El modelo para el componente 2 (áreas centro-occidentales) incluye tres variables: dos modos estivales (2 y 7) y uno invernal (5). En este caso, un alto porcentaje de la varianza de la variabilidad interanual del aNDVI se explica mediante los tres modos de circulación atmosférica (63 %), aunque es el modo estival 7 el que tiene un mayor papel en el modelo (correlación parcial = 0.65). El modelo obtenido para el componente 3 también explica un alto porcentaje de la varianza total (53%) e incluye 2 modos de circulación (patrón de verano 1 y componente invernal 4). El primero es más importante en la creación del modelo, con un valor de correlación parcial de 0.68.

*Tabla 2. Resultados de los modelos de regresión utilizados para explicar la evolución temporal del aNDVI por medio de la circulación atmosférica*

	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> Corregido</b>
COMPONENTE 1	0.49	0.24	0.2
COMPONENTE 2	0.8	0.63	0.57
COMPONENTE 3	0.73	0.53	0.48

La Fig. 5 muestra la evolución de los tres principales componentes de actividad vegetal (líneas continuas) y los modelos obtenidos mediante los patrones de circulación atmosférica (líneas punteadas). El modelo 1 muestra una gran incertidumbre, aunque la general tendencia positiva del componente queda también bien reproducida por el modelo, aunque con una menor variabilidad que los datos reales. En el caso de los componentes 2 y 3 queda más claro que la evolución temporal de los modelos obtenidos mediante los modos de circulación atmosférica presentan una gran similitud con la evolución real del aNDVI, y solamente en 1989 el modelo 3 muestra algunas diferencias con los datos reales.

La influencia de los patrones estacionales de circulación atmosférica, incluidos en los modelos, sobre las temperaturas y precipitaciones en la región central de Siberia, se muestra en las Fig. 6, 7 y 8. La Fig. 6 muestra la distribución espacial del coeficiente de correlación (R) entre la serie de cargas factoriales del patrón estival 5 y la temperatura media de verano. Este patrón de circulación produce anomalías térmicas positivas en la región central de Siberia. Sin embargo, existe una correlación negativa con la tempera-

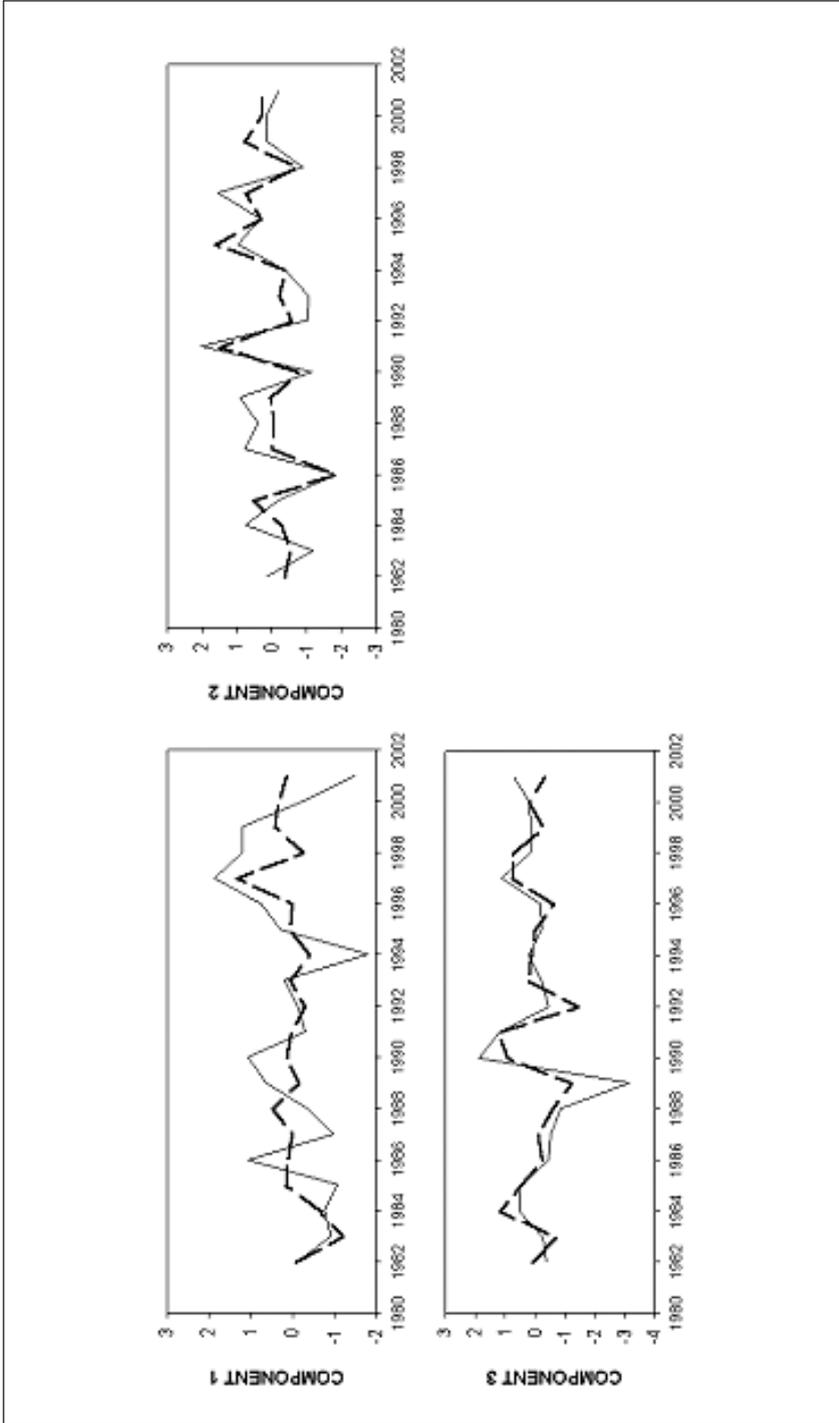


Figura 5. Comparación entre las series de los diferentes componentes y el resultados de los modelos obtenidos mediante los patrones de circulación atmosférica (líneas discontinuas)

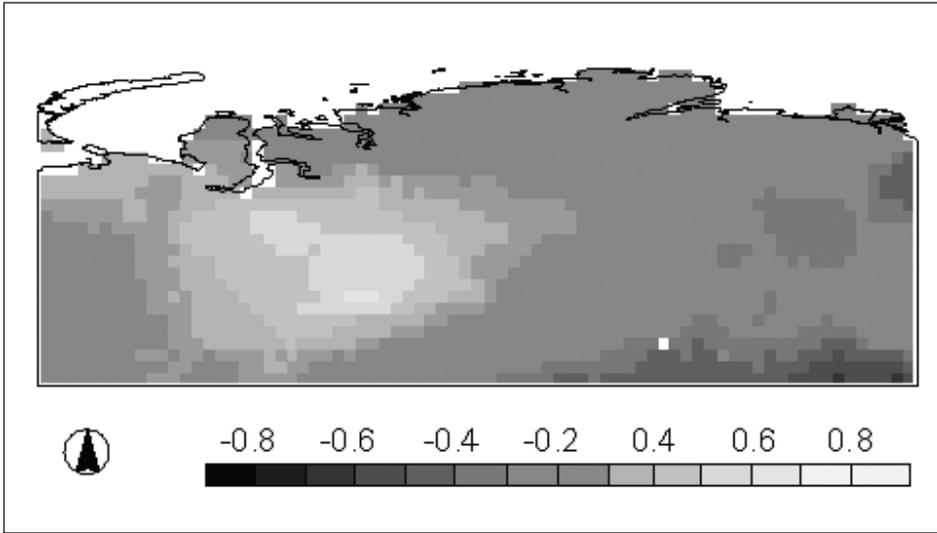


Figura 6. Distribución espacial de la correlación entre al modo 5 de verano y las temperaturas medias estivales

tura de verano en las áreas surorientales como consecuencia de la llegada de flujos fríos del norte. La evolución del aNDVI en esta área corresponde con la evolución del componente 1. Hay que considerar que estas áreas tienen una elevada altitud, y el principal limitante para el desarrollo de la vegetación es la temperatura. El patrón de circulación 5 de verano da lugar a un descenso térmico en las áreas más meridionales, aspecto que podría limitar la actividad vegetal y explicar las negativas correlaciones entre este patrón de circulación y la evolución del aNDVI.

En el caso del componente 2, tres patrones de circulación se incluyen en el modelo (los modos 2 y 7 de verano y modo 5 de invierno). La Fig. 7 muestra la correlación entre estos modos de circulación y las temperaturas y precipitaciones. El patrón 2 de verano muestra un impacto negativo sobre amplias áreas del centro del área de estudio, donde la evolución temporal de la vegetación está representada por el componente 2. El modo 7 de verano también tiene un positivo efecto sobre las temperaturas de aquellas áreas representadas por el componente 2. La influencia del modo 5 de invierno sobre las variables climáticas es menos clara, ya que no muestra una correlación significativa con las precipitaciones en las áreas occidentales de Siberia. Sin embargo, hemos encontrado una correlación positiva entre este patrón de circulación y las precipitaciones invernales que, de hecho, se producen en forma de nieve.

En las áreas en las que la evolución temporal del aNDVI está representada por el componente 3, el modelo creado mediante los patrones de circulación atmosférica incluye el modo estival 1 y modo de invierno 4. La distribución espacial de las correlaciones entre dichos patrones de circulación y las variables climáticas se muestra en la Fig. 8. El

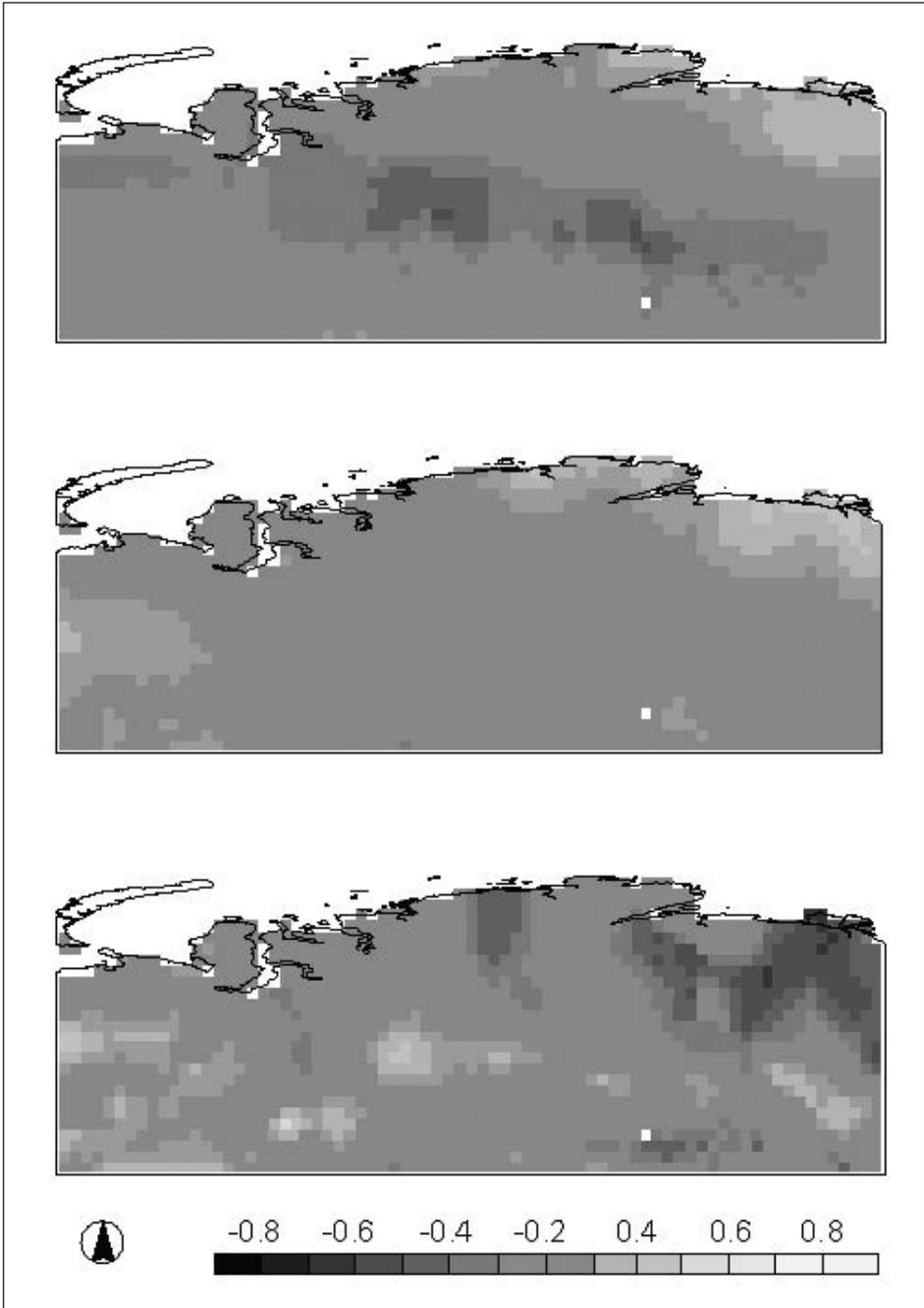


Figura 7. Distribución espacial de las correlaciones entre: arriba- modo 2 de verano y la temperatura media de verano, centro- modo 7 de verano y la temperatura de verano, abajo- modo 5 de invierno y la precipitación invernal

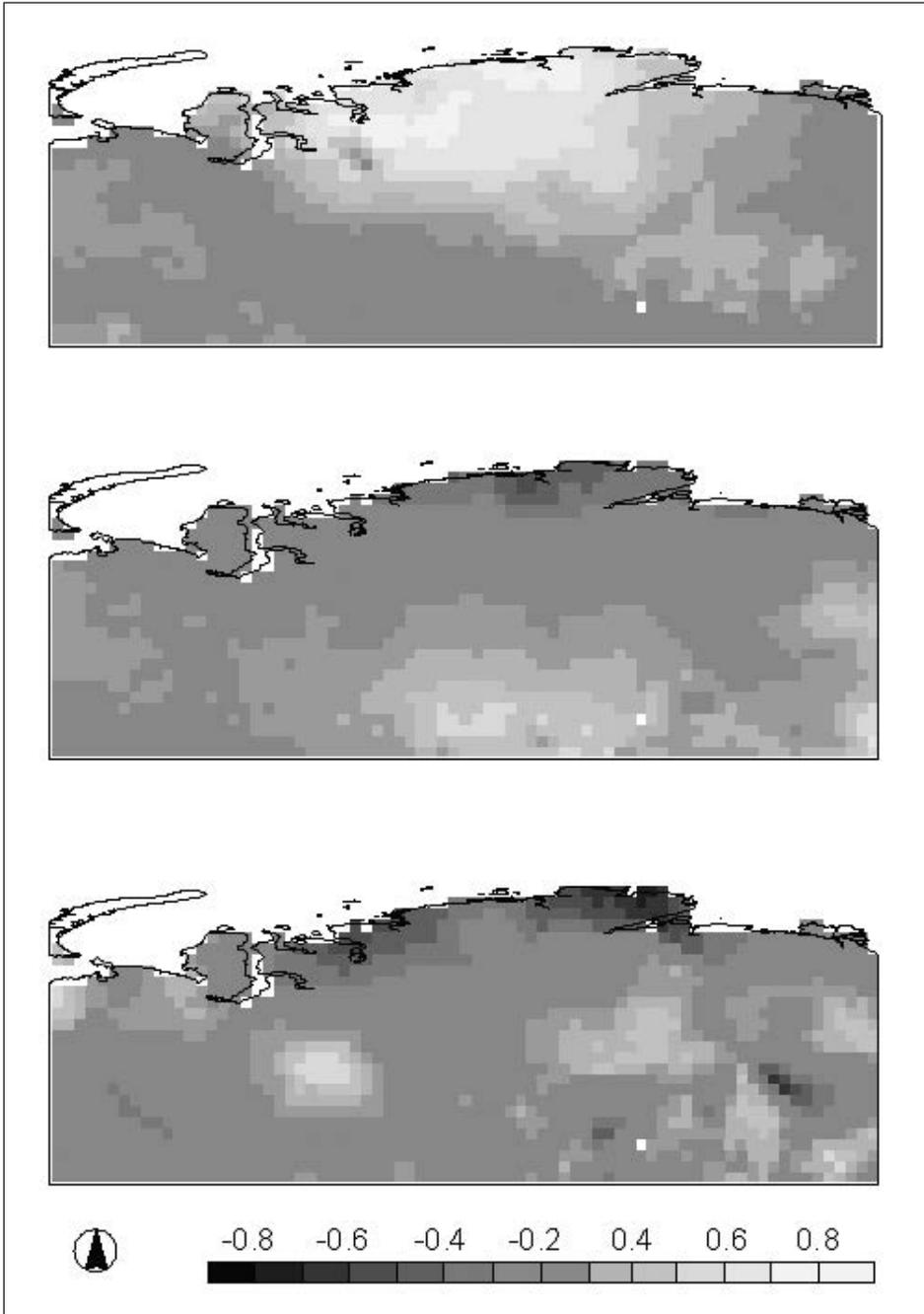


Figura 8. Distribución espacial de las correlaciones entre: arriba- modo 1 de verano y la temperatura media de verano, centro- modo 4 de invierno y la temperatura de invierno, abajo- modo 4 de invierno y la precipitación invernal

modo 1 de verano afecta positivamente las temperaturas estivales en las áreas más septentrionales, de hecho, se produce una elevada correlación en las áreas representadas por el componente 3. Ya que la temperatura es el principal factor limitante para la actividad vegetal en esta región, altos valores térmicos incrementarán el desarrollo de la vegetación. Además, aunque el modo estival 1 tiene el mayor peso en explicar la variabilidad del aNDVI en las áreas del norte, la circulación atmosférica invernal también tiene un significativo impacto. Se ha encontrado una correlación negativa entre el modo 4 de invierno y la temperatura media invernal de esta región, lo que podría estar conducido por el significativo impacto que el espesor de la nieve y el periodo de fusión nival tienen sobre la actividad vegetal estival (Grippa *et al.*, 2005).

*Tabla 3. Coeficientes estandarizados beta y correlaciones parciales de los modos de circulación atmosférica incluidos en cada modelo de regresión*

	<b>Beta</b>	<b>Parcial</b>
	<b>Componente 1</b>	
Modo 5 (verano)	-0.49	-0.49
	<b>Componente 2</b>	
Modo 2 (verano)	0.39	0.53
Modo 7 (verano)	0.52	0.65
Modo 5 (invierno)	-0.39	-0.53
	<b>Componente 3</b>	
Modo 1 (verano)	0.63	0.68
Modo 4 (invierno)	0.46	0.55

## 5. Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha analizado la influencia de la variabilidad interanual en la circulación atmosférica sobre los patrones de actividad vegetal en Siberia central. Se ha comprobado que los patrones de actividad vegetal son muy complejos, identificando tres patrones principales que representan la evolución temporal de amplias regiones (SE, W y N).

Hay que señalar las dificultades que presenta el análisis de las conexiones entre la dinámica vegetal y climática. A pesar de ello, en este trabajo se ha comprobado la existencia de un significativo impacto de la circulación atmosférica sobre las variaciones interanuales de aNDVI.

La circulación atmosférica estacional en Siberia se ha resumido mediante unos pocos patrones de circulación. Es interesante resaltar que los patrones resultan diferentes a lo largo de las tres estaciones analizadas (invierno, primavera y verano), aunque el patrón general durante las tres estaciones muestra una estructura similar al patrón anual que caracteriza la Oscilación Ártica (Thompson y Wallace, 1998).

El efecto de estos patrones de circulación atmosférica sobre la variabilidad de la actividad vegetal difiere en el espacio de forma significativa. En la explicación de la evolución de la actividad vegetal por medio de los patrones de circulación atmosférica, en las áreas representadas por el componente 1, se ha comprobado que el patrón 5 de verano afecta a las temperaturas de forma negativa, y ello podría tener una negativa influencia sobre la actividad vegetal. Estas regiones son principalmente montañosas y la temperatura es el principal limitante para el desarrollo de la vegetación. Sin embargo, un importante porcentaje de la varianza total de la actividad vegetal en estas áreas no está bien explicado por la circulación atmosférica. De hecho, el modelo únicamente explica un 24% de la varianza total.

La explicación del componente 2 (áreas occidentales) por medio de los modos de circulación atmosférica es mayor que en el caso anterior. No obstante, la influencia de los modos estivales 2 y 7 y el modo 5 de invierno es difícil de establecer en términos de precipitación y temperatura. En estas regiones centrales existe una importante conexión entre las precipitaciones estivales e invernales y la temperatura de superficie de los océanos Pacífico y Atlántico (Ye, 2000, 2001 y 2002). Por ello, resulta difícil asociar exclusivamente la dinámica climática con la circulación atmosférica regional. La humedad y temperatura de las masas de aire pueden ser muy importantes y jugar un papel más importante que la distribución espacial e intensidad de los patrones de presión.

En las zonas de tundra del norte, caracterizadas por unas condiciones climáticas extremas, la variabilidad del aNDVI está muy relacionada con la circulación atmosférica. Se ha comprobado que el modo 1 de verano afecta de forma importante la variabilidad interanual de la actividad vegetal en estas regiones. Se ha encontrado una alta correlación positiva entre el modo 1 estival y las temperaturas medias de esta estación. También existe una negativa correlación entre el modo 5 de invierno y la precipitación invernal. Ya que en estas áreas la precipitación invernal se produce en forma de nieve, la relación de este patrón de circulación con la actividad vegetal es indirecta, por medio de procesos relacionados con el espesor y la fusión de la nieve (Grippa *et al.*, 2005).

Así pues, la relación entre la variabilidad en la circulación atmosférica, las condiciones climáticas y la actividad vegetal es más clara en aquellas zonas con condiciones climáticas más limitantes, como son las áreas de tundra localizadas en la región más septentrional. En las zonas más meridionales las condiciones climáticas son menos restrictivas y otros factores como el tipo de suelo, las actividades humanas y el tipo de vegetación pueden afectar significativamente la variabilidad interanual de la actividad vegetal.

## Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo del proyecto Siberia II (V programa marco de la Unión Europea).

## Referencias bibliográficas

- AIZEN, E.M., AIZEN, V.B., MELACK, J.M., NAKAMURA, T. y OHTAT. (2001). Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. *International Journal of Climatology* 21: 535-556.
- BALDOCCHI, D.F., KELLIHER, M., BLACK, T.A. y JARVIS, P. (2000). Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. *Global Change Biology* 6: 69-83.
- BARNSTON, A.G. y LIVEZEY, R.E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review* 115: 1083-1126.
- BASNETT, T.A. y PARKER, D.E. (1997). *Development of the global mean sea level pressure data set GMSLP2*. Climate Research technical Note 79, Hadley Centre, Meteorological office, Bracknell.
- BIRD, M.I., SANTRUCKOVA, H., ARNETH, A., GRIGORIEV, S., GLEIXNER, G., KALASCHNIKOV, Y.N., LLOYD, J. y SCHULZE, E.D. (2002). Soil carbon inventories and carbon-13 on a latitude transect in Siberia. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 54: 631-641.
- BROVKIN, V., LEVIS, S., LOUTRE, M., CRUCIFIX, M., CLAUSSEN, M., GANOPOLSKI, A., KUBATZKI, C. y PETOUKHOV, V. (2003). Analysis of the Climate-Vegetation System in the Northern High Latitudes. *Climatic Change* 57: 119-138
- BUERMANN, W., ANDERSONM, B., TUCKER, C.J., DICKINSON, R.E., LUCHT, W, POTTER, C.S. y MYNENI, R.B. (2003). Inter-annual covariability in Northern hemisphere air temperatures and greenness associated with El Niño-Southern Oscillation and the Arctic Oscillation. *Journal of Geophysical Research* 108, 4396, doi: 10.1029/2002JD002630.
- CLARCK, M.P., SERREZE, M.C. y ROBINSON, D.A. (1999). Atmospheric controls on Eurasian snow extent. *International Journal of Climatology* 19: 27-40.
- DE FRIES, R.S., HANSEN, M., TOWNSHEND, J.R.G. y SOHLBERG, R. (1998). Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing* 19: 3141-3168.
- DYE, G.D. y TUCKER, C.J. (2003). Seasonality and trends of snow cover, vegetation index and temperature in northern Eurasia. *Geophysical Research Letters* 30: 1-4.

- 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.
- ESPER, J. y SCHWEINGRUBER, F.H. (2004). Large-scale treeline changes recorded in Siberia *Geophysical Research Letters* 31: Art. No. L06202.
- FRAEDRICH, K. (1994). An ENSO impact on Europe? *Tellus* 46A: 541-552.
- FUKUTOMI, Y., IGARASHI, H., MASUDA, K. y YASUNARI, T. (2003). Inter-annual variability of summer water balance components in three major river basins of northern Eurasia. *Journal of Hydrometeorology* 4: 283-296.
- GONG, D.Y. y HO, C.H. (2003). detection of large-scale climate signals in spring vegetation index (normalized difference vegetation index) over the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research* 108: 4498, doi: 10.1029/2002JD002300.
- GONG, D. y SHI, P. (2003). Northern hemispheric NDVI variations associated with large-scale climate indices in spring. *International Journal of Remote Sensing* 24: 2559-2566.
- GRIPPA, M., KERGOAT, L., LE TOAN, T., MOGNARD, N.M., DELBART, N., L'HERMITTE, J. y VICENTE-SERRANO, S.M. (2005). The impact of snow depth and snowmelt on the vegetation variability over central Siberia, *Geophysical Research Letters* 32: L21412, doi:10.1029/2005GL024286.
- HAIR, J.F., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L. y BLACK, W.C. (1998). *Multivariate data Analysis*. Prentice Hall, New York.
- HURRELL, J. y VAN LOON, H. (1997). Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change* 36: 301-326.
- JAMES, M.E. y KALLURI, S.N.V. (1994). The Pathfinder AVHRR land data set: an improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3347-3363.
- JUSTICE, C.O. y TOWNSHEND, J.R. (1994). Data sets for global remote sensing: lessons learnt. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3621-3639.
- 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.
- 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. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Remote Sensing of Environment* 82: 1949-1964.
- KOGAN, F.N. y WEI, G. (2000). Using AVHRR data for detection of El Niño/La Niña impacts on land ecosystems. *Advances in Space Research* 26: 1165-1168.

- 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.
- MITCHELL, T.D., CARTER, T.R., JONES, P.D., HULME, M. y NEW, M. (2003). A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Journal of Climate*, submitted.
- MYNENI, R.B., TUCKER, C.J., ASRAR, G. y KEELING, C.D. (1998). Inter-annual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research* 103: 6145-6160.
- NEMANI, R.R., KEELING, C.D., HASHIMOTO, H., JOLLY, W.M., PIPER, S.C., TUCKER, C.J., MYNENI, R.B. y RUNNING, S.W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* 300: 1560-1563.
- ROPELEWSKI, C.F. y HALPERT, M.S. (1987). Precipitation patterns associated with the high phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate* 2: 268-284.
- SALINAS-ZAVALA, C.A., DOUGLAS, A.V. y DIAZ, M.F. (2002). Inter-annual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sensing of Environment* 82: 417-430.
- SCHULTZ, P.A. y HALPERT, M.S. (1993). Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research* 13: 277-280.
- SHABANOV, N.V., ZHOU, L., KNYAZIKHIN, Y., MYNENI, R.B. y TUCKER, C.J. (2002). Analysis of inter-annual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40: 115-130.
- 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.
- SMITH, P.M., KALLURI, S.N.V., PRINCE, S.D. y DEFRIES, R.S. (1997). The NOAA/NASA pathfinder AVHRR 8-km land data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63: 12-31.
- SUZUKI, R., TANAKA, S. y YASUNARI, T. (2000). Relationships between meridional profiles of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate over Siberia. *International Journal of Climatology* 20: 955-967.
- THOMPSON, D.W.J. y WALLACE, J.M. (1998). The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters* 25: 1297-1300.
- THOMPSON, D.W., BALDWIN, M.P. y WALLACE, J.M. (2002). Stratospheric Connection to Northern Hemisphere Wintertime Weather: Implications for Prediction. *Journal of Climate* 15: 1421-1428.

- TRENBERTH, K.E. y PAOLINO, D.A. (1980). The northern hemisphere sea-level pressure data set: trends, errors and discontinuities. *Monthly Weather Review* 108: 855-872.
- TUCKER, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- VICENTE-SERRANO, S.M. y HEREDIA, A. (2004). NAO influence on NDVI trends in the Iberian Peninsula (1982-2000). *International Journal of Remote Sensing* 25: 2871-2879.
- VICENTE-SERRANO, S.M., DELBART, N., LE TOAN, T. y GRIPPA, M. (2006). El Niño-Southern Oscillation influences the inter-annual variability of leaf appearance dates in central Siberia. *Geophysical Research Letters*. 33, L03707, doi: 10.1029/2005GL025000.
- VICENTE-SERRANO, S.M., GRIPPA, M., DELBART, N., LE TOAN, T. y KERGOAT, L. (2006b). Influence of seasonal pressure patterns on temporal variability of vegetation activity in central Siberia. *International Journal of Climatology* 26: 303-321.
- WALLACE, J.M. y GUTZLER, D.S. (1981). Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review* 109: 784-812.
- WANG, J.X.L. y CHO, H.R. (1997). Spatial-temporal structures of trend and oscillatory variabilities of precipitation over Northern Eurasia. *Journal of Climate* 10: 2285-2298.
- WANG, G.L. (2003). Reassessing the impact of North Atlantic Oscillation in the sub-Saharan vegetation productivity. *Global Change Biology* 9: 493-499.
- WANG, G. y YOU, L. (2004). delayed impact of the North Atlantic Oscillation on biosphere productivity in Asia. *Geophysical Research Letters* 31: L12210, doi: 10.1029/2004GL019766.
- YE, H. (2000). Decadal variability of Russian winter snow accumulation and its associations with Atlantic sea surface temperature anomalies. *International Journal of Climatology* 20: 1709-1728.
- YE, H. (2001). Characteristic of winter precipitation variation over northern central Eurasia and their connections to sea surface temperatures over the Atlantic and Pacific oceans. *Journal of Climate* 14: 3140-3155.
- YE, H. (2002). Observed regional and climatological associations between spring and summer precipitation over northern central Eurasia. *Water Resources Research* 32: 1317, doi: 10.1029/2001WR001060.
- ZHANG, X., FRIEDL, M.A., SCHAAF, C.B., STRAHLER, A.H., HODGES, J.C.F., GAO, F., REED, B.C. y HUETE, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 84: 471-475.
- ZHANG, X., FRIEDL, M.A., SCHAAF, C.B. y STRAHLER, A.H. (2004). Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology* 10: 1133-1145.
- ZHOU, L., KAUFMANN, R.K., TIAN, Y., MYNENI, R.B. y TUCKER, C.J. (2003). Relation between inter-annual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999. *Journal of Geophysical Research*. 108.